



TUGAS AKHIR - TF 141581

**ANALISA DAN PENGARUH *SWIRL NUMBER*
PADA *CONICAL QUARL SWIRL BURNER* PADA
JENIS *PARTIALLY PREMIXED COMBUSTION*
DENGAN MENGGUNAKAN *MODEL LARGE-
EDDY SIMULATIONS***

**ARYO PRASTYO AJI
NRP 02311440000116**

**Dosen Pembimbing
Gunawan Nugroho, ST, MT, Ph.D**

**DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018**

Halaman ini sengaja dikosongkan



FINAL PROJECT - TF 141581

ANALYSIS AND EFFECT OF SWIRL NUMBER ON CONICAL QUARL SWIRL BURNER AT PARTIALLY PREMIXED COMBUSTION BY USING MODEL LARGE-EDDY SIMULATIONS

ARYO PRASTYO AJI
NRP. 02311440000116

Supervisor
Gunawan Nugroho S.T. M.T. P.hD

DEPARTMENT OF ENGINEERING PHYSICS
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2018

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

Saya yang bertanda tangan di bawah ini

| | |
|-------------------|--------------------------------------|
| Nama | :Aryo Prastyo Aji |
| NRP | :02311440000116 |
| Departemen/ Prodi | :Teknik Fisika/ S1 Teknik Fisika |
| Fakultas | :Fakultas Teknologi Industri |
| Perguruan Tinggi | :Institut Teknologi Sepuluh Nopember |

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Analisa dan Pengaruh *Swirl Number* Pada *Conical Quarl Swirl Burner* Pada Jenis *Partially Premixed Combustion* Dengan Menggunakan *Model Large-Eddy Simulations*” adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya.

Surabaya, 19 Juli 2018
Yang membuat pernyataan,



Aryo Prastyo Aji
NRP. 02311440000116

Halaman ini memang dikosongkan

**LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR**


**ANALISA DAN PENGARUH *SWIRL NUMBER* PADA
CONICAL QUARL SWIRL BURNER PADA JENIS
PARTIALLY PREMIXED COMBUSTION DENGAN
MENGGUNAKAN *MODEL LARGE-EDDY SIMULATIONS***

Oleh:

Aryo Prastyo Aji
NRP. 02311440000116

Surabaya, 19 Juli 2018

**Menyetujui,
Pembimbing**



Gunawan Nugroho S.T. M.T. Ph. D
NIP. 19761223 200501 1 001



**Mengetahui,
Kepala Departemen
Teknik Fisika FTI - ITS**

Agus Muhammad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D.
NIP. 19780902 200312 1 002

Halaman ini sengaja dikosongkan

**ANALISA DAN PENGARUH SWIRL NUMBER PADA
CONICAL QUARL SWIRL BURNER PADA JENIS
PARTIALLY PREMIXED COMBUSTION DENGAN
MENGUNAKAN MODEL LARGE-EDDY SIMULATIONS**

TUGAS AKHIR

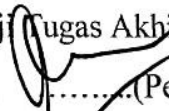
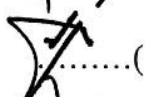


Ditujukan untuk Memenuhi Salah Satu
Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Rekayasa Energi
Program Studi S-I Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

ARYO PRASTYO AJI

NRP. 02311440000116

Disetujui Oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

- | | |
|---------------------------------------|--|
| 1. Gunawan Nugroho, S.T., M.T., Ph.D. |  (Pembimbing) |
| 2. Ir. Roekmono, M.T. |  (Penguji I) |
| 3. Ir. Harsono Hadi, M.T., Ph.D. |  (Penguji II) |
| 4. Detak Yan Pratama, S.T., M.Sc. |  (Penguji III) |

**SURABAYA
JULI 2018**

Halaman ini sengaja dikosongkan

**ANALISA DAN PENGARUH SWIRL NUMBER PADA
CONICAL QUARL SWIRL BURNER PADA JENIS
PARTIALLY PREMIXED COMBUSTION DENGAN
MENGUNAKAN MODEL LARGE-EDDY SIMULATIONS**

Nama : Aryo Prastyo Aji
NRP : 02311440000116
Departemen : Teknik Fisika, FTI - ITS
Pembimbing : Gunawan Nugroho, S.T., M.T, Ph.D

Abstrak

Emisi NO_x dengan kriteria *ultra low* sangat diharapkan pada pembakaran turbin gas. Penerapan pembakaran dengan model *non-premixed flame* banyak digunakan karena model pembakaran ini memiliki stabilitas dan pengendalian yang baik. Tetapi, pembakaran jenis ini memiliki beberapa kekurangan diantaranya terdapat emisi jelaga dan NO_x. Dipasanginya *swirling injectors* yang dapat difungsikan untuk mengoptimalkan pencampuran antara bahan bakar dan udara, dengan optimalnya pembakaran sehingga dapat mengurangi polutan yang dihasilkan. Penelitian ini menggunakan penerapan konsep *Partially Premixed Combustion* dan pengaruh dari *swirl number* pada ruang pembakaran. 4 variasi utama *swirl number* yang masing-masing variasi memiliki 3 subvariasi *equivalence ratio* dengan nilai *equivalence ratio* sebesar 1,6, 1,97, dan 2,4 Variasi *swirl number* dengan interval antar variasi nilai *swirl number* sebesar 0.1. Disemua reaksi pembakaran terjadi penurunan *temperature* yang signifikan dengan rata-rata penurunan sebesar 1782,645 K. Perbedaan nilai *swirl number* berpengaruh terhadap perubahan *temperature* tetapi pengaruh *swirl number* berfluktuasi dengan pola perubahan naik turun *temperature* yang cenderung sama. Dengan *temperature* maksimum terdapat pada *swirl number* 0,57 pada *equivalence ratio* 1,6 dan 1,97 sedangkan pada *equivalence ratio* 2,4 memiliki *temperature* maksimum pada *swirl number* 0,77. Dengan *flame stagnation point* maksimum terdapat pada *swirl number* 0,57 pada *equivalence ratio* 1,6 yaitu disekitar 0,05856 m. Pengaruh polutan NO_x terhadap *swirl number* disetiap *equivalence ratio* didapat bahwa pola meningkat dan turunnya nilai polutan disetiap *swirl number* sama dengan pola naik turunnya nilai *temperature* di setiap *swirl number*. Polutan NO_x didapat maksimum pada *equivalence ratio* 1,6 dengan *swirl number* 0,57 dan terjadi perbedaan nilai polutan yang signifikan dimana pada

equivalence ratio 1,97 dan 2,4 memiliki nilai jauh lebih rendah. Pembakaran paling sempurna dengan rendahnya nilai *swirl number* yaitu pada *swirl number* 0,77 pada *equivalence ratio* 1,97 dan 2,4. Sedangkan, pada *equivalence ratio* 1,6 terdapat perbedaan dimana pembakaran dengan fraksi massa CO paling rendah terdapat pada *swirl number* 0,57 dan dapat dikatakan pembakaran paling sempurna pada *equivalence ratio* 1,6 yaitu *swirl number* 0,57.

Kata Kunci : *Partially Premixed Combustion* , *Temperature*, *Emisi NOx*, *Swirl Number*.

ANALYSIS AND EFFECT OF SWIRL NUMBER ON CONICAL QUARL SWIRL BURNER AT PARTIALLY PREMIXED COMBUSTION BY USING MODEL LARGE- EDDY SIMULATIONS

Student's Name : Aryo Prastyo Aji
NRP : 02311440000116
Department : Engineering Physics, FTI – ITS
Supervisor : Gunawan Nugroho S.T. M.T. Ph.D

Abstract

NOx emissions with ultra-low criteria are desirable for combustion of gas turbines. Application of combustion with non-premixed flame model is widely used because this combustion model has good stability and control. However, this type of combustion has several disadvantages including soot emissions and NOx. Installation of swirling injectors that can be enabled to optimize the mixing of fuel and air, with optimal combustion to reduce the pollutant produced. This study uses the application of the concept of Partially Premixed Combustion and the influence of swirl number on the combustion chamber. 4 main variations of swirl number each variation has 3 subvariations equivalence ratio with equivalence ratio value equal to 1,6, 1,97, and 2,4 variation of swirl number with an interval between a variation of the value of swirl number equal to 0,1. In all combustion reactions, there was a significant decrease in temperature with an average decrease of 1782,645 K. There was a similarity in the decrease in the value of the temperature in all equivalence ratios of swirl number 0.57 to 0.67. The different swirl number values associated with the temperature and influence of the swirl numbers fluctuate with the rising parameters being the same temperature. With maximum temperatures found on the swirl number of 0.57 on the equivalence ratio of 1.6 and 1.97 whereas in the 2.4 equality ratio has the maximum temperature at the swirl number of 0.77. With the maximum flame stagnation point is found on the swirl number of 0.57 at the equivalence ratio of 1.6 which is located 0.05856 m. An indicator of NOx pollution on swirl number in each equivalence ratio shows that the pattern of rising and fall of pollutant value in each swirl number is similar to the pattern of fluctuation of the temperature value in each swirl number. NOx Pollutant obtained a maximum comparison on equality of 1.6 with swirl number 0.57 and the occurrence of significant pollutant

prices in the ratio of equality of 1.97 and 2.4 has a much lower value. The most perfect burning with the low swirl number is swirl 0.77 at the 1.97 and 2.4 equivalence ratios. Whereas, in the equivalence ratio 1.6 there is a value with the lowest CO mass fraction in the amount of swirl 0.57 and can be said the most perfect at the equivalence ratio 1.6 is the swirl number 0.57.

Keywords : Partially Premixed Combustion, swirl number, equivalence ratio, and NOx pollutant

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji dan syukur senantiasa penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, karena atas petunjuk dan karunia-Nya penulis mampu melaksanakan dan menyelesaikan penelitian tugas akhir dengan judul “ **Analisa Dan Pengaruh Swirl Number Pada Conical Quarl Swirl Burner Pada Jenis Partially Premixed Combustion Dengan Menggunakan Model Large-Eddy Simulations** ”.

Dalam proses penyelesaian tugas akhir ini, penulis banyak mendapatkan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena pada kesempatan ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT yang senantiasa memberikan rahmat, kasih sayang, dan keberkahan. Sehingga penulis diberi kelancaran dalam pelaksanaan tugas akhir ini.
2. Kedua orang tua penulis, Ir. Anton Sumitro Adi dan Ir. Arimin Dijah Setiarini beserta adik saya Yugo Adi Sasono yang senantiasa mendukung penulis baik melalui doa-doanya dan dukungan dalam bentuk materiil.
3. Bapak Agus Muhammad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D. selaku ketua departemen Teknik Fisika FTI ITS
4. Bapak Gunawan Nugroho S.T. M.T. P.hD, selaku dosen pembimbing tugas akhir yang selalu memberikan bimbingan, arahan, dan motivasi kepada penulis selama pelaksanaan tugas akhir ini
5. Seluruh Bapak dan Ibu dosen yang telah banyak memberikan ilmu selama masa perkuliahan
6. Teman – teman TA-wan energi yang banyak membantu dalam berdiskusi tentang turbin hingga proses simulasi pada penelitian ini
7. Teman – teman KSE Laboratorium Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan yang telah menjadi rumah kedua bagi penulis selama menjalani perkuliahan
8. Teman – teman angkatan 2014, *Tree Fortress*, yang telah memberikan banyak cerita selama di Teknik Fisika

9. Semua pihak yang telah membantu dalam pelaksanaan penelitian hingga penyusunan laporan tugas akhir ini.

Semoga laporan tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi pembacanya. Penulis menyadari bahwa masih terdapat kekurangan dalam laporan tugas akhir ini, maka dari itu kritik dan saran yang membangun dari berbagai pihak sangat diharapkan.

Surabaya, Juli 2018

Penulis

DAFTAR ISI

| | Halaman |
|---|-----------|
| HALAMAN JUDUL..... | i |
| <i>PAGE OF TITLE</i> | iii |
| PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME..... | v |
| LEMBAR PENGESAHAN I | vii |
| LEMBAR PENGESAHAN II | ix |
| Abstrak | xi |
| <i>Abstract</i> | xiii |
| KATA PENGANTAR..... | xv |
| DAFTAR ISI..... | xvii |
| DAFTAR GAMBAR | xix |
| DAFTAR TABEL | xxiii |
| BAB I PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1. Latar Belakang | 1 |
| 1.2. Rumusan Masalah | 3 |
| 1.3. Tujuan Penelitian | 3 |
| 1.4. Batasan Masalah | 3 |
| 1.5. Manfaat Penelitian | 4 |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA | 5 |
| 2.1. Turbin Gas | 5 |
| 2.2. Stoikiometri Pembakaran | 6 |
| 2.3. <i>Partially Premixed Combustion</i> | 8 |
| 2.4. Aliran <i>swirl</i> Pada Sistem Pembakaran | 9 |
| 2.5. <i>Computational Fluid Dynamics</i> | 10 |
| 2.6. <i>Large Eddy Simulations</i> | 11 |
| BAB III METODOLOGI PENELITIAN | 15 |
| 3.1. Diagram Alir Penelitian | 15 |
| 3.2. Pengumpulan Data | 16 |
| 3.3. Perhitungan Rasio Bahan Bakar dan Udara..... | 19 |
| 3.4. Pemodelan Reaksi <i>Partially Premixed Combustion</i> menggunakan metode <i>Computational Fluid Dynamics</i> | 20 |
| BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN | 25 |

| | | |
|-------------------------------------|--|-----------|
| 4.1. | Validasi Hasil Simulasi CFD | 25 |
| 4.2. | Data Hasil Simulasi Reaksi Pembakaran..... | 27 |
| BAB V PENUTUP DAN SARAN..... | | 49 |
| 5.1. | Kesimpulan | 49 |
| 5.2. | Saran | 50 |
| DAFTAR PUSTAKA..... | | 51 |
| LAMPIRAN | | |
| BIODATA PENULIS | | |

DAFTAR GAMBAR

| | | |
|------------|---|----|
| Gambar 2.1 | Sistem Turbin Gas (<i>source: www.energy.gov</i>) | 5 |
| Gambar 2.2 | Pembakaran sempurna CH ₄ dan udara | 6 |
| Gambar 2.3 | Skema <i>Partially Partially Premixed Combustion</i> (Sumber: https://www.iitk.ac.in) | 8 |
| Gambar 3.1 | Diagram Alir Penelitian | 16 |
| Gambar 3.2 | Desain <i>Combustion chamber</i> | 17 |
| Gambar 3.3 | Domain fluida pada <i>Burner</i> | 20 |
| Gambar 3.4 | Hasil Kualitas <i>Skewness</i> dan <i>Orthogonal</i> | 21 |
| Gambar 3.5 | Kriteria kualitas <i>skewness</i> dan <i>orthogonal</i> | 22 |
| Gambar 3.6 | Contoh Hasil Meshing | 22 |
| Gambar 4.1 | Kontur temperature data validasi pada <i>equivalence ratio</i> (a) 1,6 (b) 1,97 dan (c) 2,4 | 26 |
| Gambar 4.2 | Grafik Temperature terhadap <i>swirl number</i> pada <i>equivalence ratio</i> 1,6 | 29 |
| Gambar 4.3 | Grafik Pollutan NO _x terhadap <i>swirl number</i> pada <i>equivalence ratio</i> 1,6 | 30 |
| Gambar 4.4 | Grafik polutan CO terhadap <i>swirl number</i> pada <i>equivalence ratio</i> 1,6. | 31 |
| Gambar 4.5 | kontur temperature penampang melintang pada <i>swirl number</i> 0,47. Dengan <i>equivalence ratio</i> (a) 1,6 (b) 1,97 (c) 2,4 | 32 |
| Gambar 4.6 | kontur temperature penampang melintang pada <i>equivalence ratio</i> 1,6. Dengan <i>swirl number</i> (a) 0,47 (b) 0,57 (c) 0,67,dan (d) 0,77. | 33 |
| Gambar 4.7 | Temperature axial radius pada <i>equivalence ratio</i> 1,6 dengan variasi empat <i>swirl number</i> | 34 |

| | | |
|-------------|---|----|
| Gambar 4.8 | Grafik temperature terhadap <i>swirl number</i> pada <i>equivalence ratio</i> 1,97 | 35 |
| Gambar 4.9 | Grafik polutan terhadap <i>swirl number</i> pada <i>equivalence ratio</i> 1,97 | 36 |
| Gambar 4.10 | Grafik polutan CO terhadap <i>swirl number</i> pada <i>equivalence ratio</i> 1,97. | 37 |
| Gambar 4.11 | Kontur temperature pada <i>Equivalence Ratio</i> Dengan <i>swirl number</i> (a) 0,47 (b) 0,57 (c) 0,67, dan (d) 0,77 | 38 |
| Gambar 4.12 | kontur temperature penampang melintang pada <i>equivalence ratio</i> 1,6 dengan <i>swirl number</i> (a) 0,47 (b) 0,57 (c) 0,67, dan (d) 0,77 | 39 |
| Gambar 4.13 | Temperature axial radius pada <i>equivalence ratio</i> 1,97 dengan variasi empat <i>swirl number</i> . | 40 |
| Gambar 4.14 | Grafik temperature terhadap <i>swirl number</i> pada <i>equivalence ratio</i> 2,4 | 41 |
| Gambar 4.15 | Grafik polutan terhadap <i>swirl number</i> pada <i>equivalence ratio</i> 2,4 | 42 |
| Gambar 4.16 | Grafik polutan CO terhadap <i>swirl number</i> pada <i>equivalence ratio</i> 2,4 | 43 |
| Gambar 4.17 | kontur temperature pada <i>Equivalence Ratio</i> 2,4 Dengan <i>swirl number</i> (a) 0,47 (b) 0,57 (c) 0,67, dan (d) 0,77 | 44 |
| Gambar 4.18 | kontur temperature penampang melintang pada <i>equivalence ratio</i> 1,6. Dengan <i>swirl number</i> (a) 0,47 (b) 0,57 (c) 0,67, dan (d) 0,77 | 45 |
| Gambar 4.19 | Temperature axial radius pada <i>equivalence ratio</i> 1,97 dengan variasi empat <i>swirl number</i> . | 46 |

Gambar 4.20 Vektor kecepatan tangensial disetiap variasi *swirl number* **(a)** 0,47 **(b)** 0,57 **(c)** 0,67 **(d)** 0,77. 48

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

| | |
|--|----|
| Tabel 3.1. Data <i>operationg condition</i> | 18 |
| Tabel 3.2. <i>Boundary Condition</i> | 23 |
| Tabel 3.3. Persamaan Turbulen | 23 |
| Tabel 4.1. Hasil Validasi dengan data eksperimental | 25 |
| Tabel 4.2. Data Hasil Temperature dan NO _x disetiap variasi | 28 |

Halaman ini memang dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pembangkit listrik dengan bahan bakar batu bara merupakan salah satu pembangkit yang sering ditemukan saat ini. Di satu sisi pembakaran batu bara diperkirakan akan terus meningkat. Tetapi disisi lain, emisi gas karbon dioksida yang mana akan menyebabkan perubahan iklim perlu dikurangi (Metz B, dkk, 2005). Strategi efektif untuk mengurangi, mengumpulkan, dan menyimpan CO₂ perlu diteliti. Teknologi yang mutakhir adalah proses pembakaran *Oxyfuel* dimana udara disubstitusikan dengan oksigen dan *exhaust gas* dan di resirkulasi untuk mengendalikan temperature dari api (Becker, L.G. dkk, 2017). Teknologi ini memiliki potensi yang besar untuk di implementasikan ke pembangkit listrik yang telah ada. Pemodelan eksperimen dan numerik untuk meneliti pembakaran dengan *oxyfuel* telah diteliti oleh Chen, L dkk (2012).

Emisi NO_x dengan kriteria *ultra low* sangat diharapkan pada pembakaran turbin gas. Penerapan pembakaran dengan model *non-premixed flame* banyak digunakan pada *aero-engines* karena model pembakaran ini memiliki stabilitas dan pengendalian yang baik (Liu, X, dkk, 2017). Tetapi, pembakaran jenis ini memiliki beberapa kekurangan diantaranya terdapat emisi jelaga dan NO_x. Selain itu, terdapat pembakaran jenis *lean premixed combustion* yang biasa digunakan pada pembangkit turbin gas yang memiliki pembakaran dengan *temperature* rendah dan memiliki kecepatan yang rendah dalam pembentukan NO_x sehingga dapat mengurangi emisi NO_x. Pada peristiwa pembakaran sering kali terjadinya *quenching* pencampuran antara bahan bakar dan udara pada *combustor*. Untuk menghindari *quenching*, dipasang *swirling injectors* yang dapat difungsikan untuk mengoptimalkan pencampuran antara bahan bakar dan udara (Li, S, 2017) dan juga untuk menstabilkan *flame* dari pembakaran *partially premixed*. Kerap kali pembakaran dengan adanya *swirl flows* dapat menyebabkan ketidakstabilan aliran dan osilasi pembakaran. Efek

Ketidakstabilan ini dapat di minimalisir dengan menggunakan *quarl* dengan jenis *conical quarl* (Liu, X, dkk, 2017) telah melakukan studi mengenai *conical quarl* dan didapatkan bahwa *flame* yang melewati *conical quarl* dapat menstabilkan *flame* yang dihasilkan.

Metode yang umum digunakan untuk menghitung properti dari *flame turbulent* dan sistem pembakaran didasarkan pada metode *Reynolds of the Navier Stokes equation* (RANS). Tetapi metode ini memiliki keterbatasan diantaranya, simulasi hanya dapat dilakukan pada keadaan skala besar, struktur turbulen yang tidak stasioner, *streamline curvature*, dan *non-gradient transport*. Untuk mengatasi keterbatasan dari metode RANS ini, maka digunakan metode *Large eddy simulation* (LES) yang dapat mengatasi berbagai keterbatasan yang terdapat pada metode RANS (Di Mare,F, Jones, W.P., & Menziez,K. R., 2004). Pada simulasi dengan metode LES, metode ini menggunakan objek 3 dimensi dan transien sehingga dapat diketahui hasil simulasi yang direpresentasikan terhadap fungsi waktu. Pemanfaatan metode LES di beberapa studi terdahulu menyatakan bahwa LES dapat digunakan pada persamaan Navier stokes yang kompleks (Eldrainy, Y, dkk, 2011) dan dapat menyelesaikan kasus *unsteady*, reaksi pada aliran, dan aliran yang memiliki *multi-species* (Li,S, dkk 2015).

Dari penelitian-penelitian mengenai pembakaran *partially-premixed* tersebut, masih diperlukan penelitian lanjutan berbasis simulasi numerik pada turbin gas *combustor*. Penelitian akan dilakukan dengan metode pembakaran *partially premixed* pada *combustion chamber* yang memiliki *quarl* berupa *conical quarl*, simulasi ini akan dikalkulasi dengan model large-eddy simulation dengan memperhitungkan variasi *swirl number*. Sehingga, dapat diketahui pengaruh *swirl number* pada proses pembakaran *partially-premixed* di *combustion chamber* yang dilengkapi *conical quarl*.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun permasalahan yang ingin diselesaikan dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana karakteristik penerapan *partially premixed combustion* terhadap variasi *swirl number*.
2. Bagaimana pengaruh variasi *swirl number* terhadap *temperature flame* dan *stagnation point flame* yang dihasilkan.
3. Bagaimana pengaruh variasi *swirl number* terhadap emisi polutan yang dihasilkan.

1.3 Tujuan

Tujuan umum dari penelitian ini adalah mencari adanya Adapun tujuan dilakukannya penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui karakteristik penerapan *partially premixed combustion* terhadap variasi *swirl number*.
2. Mengetahui pengaruh variasi *swirl number* terhadap *temperature flame* dan *stagnation point flame* yang dihasilkan.
3. Mengetahui pengaruh variasi *swirl number* terhadap emisi polutan yang dihasilkan.

1.4 Batasan Masalah

Penelitian ini dilakukan secara simulasi dengan menggunakan metode numerikal *Computational Fluid Dynamic*. Model ruang pembakaran yang digunakan berdasarkan penelitian L.G. Becker, dkk (2017). Untuk memfokuskan penyelesaian masalah pada penelitian tugas akhir ini diperlukan beberapa batasan masalah diantaranya sebagai berikut:

1. *Combustion chamber* yang digunakan adalah *conical quarl*
2. Proses pembakaran yang diterapkan menggunakan *partially-premixed combustion*

3. Aliran pada *combustion chamber* adalah *transient flow*, *incompressible flow*, dan seragam pada sisi inlet
4. Model numerik yang digunakan menggunakan model turbulensi *large eddy simulations*
5. Swirl dibangkitkan dari inlet udara yang terdapat pada *burner*.
6. Mode iterasi yang digunakan adalah *Bounded second order upwind*
7. Pembakaran ini menggunakan bahan bakar *Oxyfuel*

1.5 Manfaat Penelitian

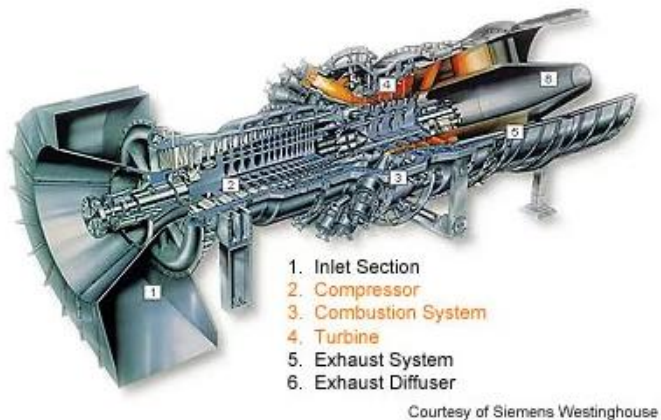
Manfaat dari penelitian tugas akhir ini adalah dapat ditemukannya parameter yang mempengaruhi performansi dari ruang pembakaran turbin gas. Selain itu penelitian ini, juga sebagai tambahan kajian untuk penerapan konsep *Partially Premixed Combustion* pada turbin gas.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Turbin Gas

Turbin gas terdiri dari tiga komponen utama, yaitu *compressor*, *combustion system*, dan *turbine*. Turbin gas merupakan sebuah mesin panas pembakaran dalam, proses kerjanya seperti motor bakar yaitu udara atmosfer dihisap masuk kompresor dan dikompresi, kemudian udara mampat masuk ruang bakar dan dipakai untuk proses pembakaran, sehingga diperoleh suatu energi panas yang besar. Energi panas tersebut diekspansikan pada turbin dan menghasilkan energi mekanik pada poros. Pada gambar 2.1 merupakan bagian-bagian dari turbin gas.



Gambar 2.1 Sistem Turbin Gas (Sumber: www.energy.gov)

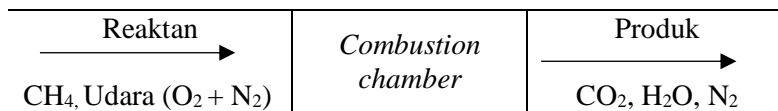
Didalam *combustion chamber*, udara bercampur dengan bahan bakar dan terbakar secara isobaric. Gas panas dari *combustor* mengalir ke turbin melalui bagian depan *exhaust gas* sehingga sudu turbin dapat berputar (Turns, 2017). *Combustion chamber* adalah tempat dimana proses pembakaran terjadi. Setiap bagian dari *combustion chamber* mempengaruhi proses dari pembakaran.

Salah satu kunci efisiensi bahan bakar-ke-turbin adalah suhu di mana ia beroperasi. Suhu yang lebih tinggi biasanya berarti efisiensi yang lebih tinggi, yang pada gilirannya, dapat menyebabkan operasi yang lebih ekonomis. Gas yang mengalir melalui turbin pembangkit listrik bisa sama panasnya dengan 2300°F, tetapi beberapa logam penting dalam turbin dapat bertahan hanya dengan suhu panas 1500 hingga 1700°F. Oleh karena itu, udara dari kompresor mungkin digunakan untuk pendinginan. komponen turbin utama, mengurangi efisiensi termal tertinggi.

2.2 Stoikiometri Pembakaran

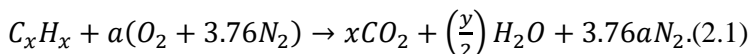
Kuantitas stoikiometri adalah rasio antara berat udara (*oxidizer*) yang dibutuhkan dengan berat bahan bakar. Jika rasio antara bahan bakar dan *oxidizer* lebih besar dari kondisi stoikiometri, maka proses pembakaran akan terjadi pada kondisi lean. Sedangkan, jika jumlah udara yang diberikan kurang dari atau tidak mencapai kondisi stoikiometri, maka proses pembakaran dikatakan terjadi pada kondisi *rich*.

Pada gambar 2.2 menunjukkan sistem pembakaran dengan kriteria pembakaran sempurna dari methane dan udara yang terdiri dari oksigen dan nitrogen untuk membentuk karbon dioksida, nitrogen, dan air sebagai hasil reaksi.



Gambar 2.2 Pembakaran sempurna CH_4 dan udara.

Rasio antara *oxidizer* dan bahan bakar ditentukan dengan menulis reaksi kesetimbangan, dengan asumsi bahan bakar bereaksi membentuk produk. Untuk bahan bakar *hydrocarbon* dengan struktur C_xH_y , reaksi kesetimbangan dapat dituliskan sebagai berikut (Irianto, S.K. & Nugroho, G):



dimana,

$$a = x + \frac{y}{4} \dots \dots \dots (2.2)$$

Reaksi kesetimbangan diatas dapat disederhanakan dengan mengasumsi komposisi udara adalah 21% oksigen (O₂), dan 79% Nitrogen (N₂), jadi untuk setiap mol oksigen mengandung 3.76 mol nitrogen. Persamaan 2.1 menggambarkan pemecahan ikatan antara atom (atau elemen) membentuk molekul C_xH_y dan oksigen, dan pengaturan ulangnya membangun molekul karbon dioksida dan air. Koefisien dalam persamaan 2.1 ditentukan dari pertimbangan konservasi atom. Koefisien dalam Persamaan. 1,26 untuk persamaan reaksi kimia stoikiometrik, proporsi reaktan-tanpa bahan bakar atau oksidan berlebih. Koefisien dalam persamaan kimia lebih sering dianggap sebagai jumlah Kmoles zat yang mengambil bagian dalam reaksi. Di mana semua zat mengambil bagian dalam reaksi kimia dapat diperlakukan sebagai gas ideal, koefisien dalam kimia Persamaan dapat secara alternatif dianggap sebagai proporsi volumetrik, karena pada suhu tetap dan tekanan gas yang ideal akan menempati volume yang sama. Ekvivalen rasio untuk fuel-air dapat dituliskan sebagai berikut (Irianto, S.K. & Nugroho, G):

$$\frac{A}{F_{stoic}} = \left(\frac{m_{air}}{m_{fuel}} \right)_{stoic} = \frac{4.76}{1} \frac{MW_{air}}{MW_{fuel}} \dots \dots \dots (2.3)$$

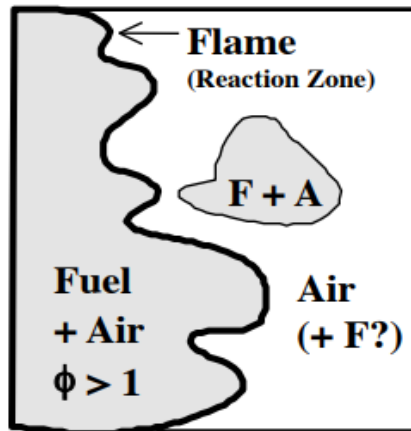
MW_{air} dan MW_{fuel} adalah berat molekul dari udara dan bahan bakar. Pada umumnya, mixture ratio antara fuel-air dapat dituliskan sebagai ekvivalen rasio sebagai berikut:

$$\Phi = \frac{(A/F)_{stoic}}{A/F} = \frac{F/A}{(F/A)_{stoic}} \dots \dots \dots (2.4)$$

Dari definisi diatas, dapat diketahui bahwa untuk kondisi *rich* yang biasa digunakan untuk pembakaran tipe *partially premixed* memiliki $\Phi > 1$. Sedangkan untuk kondisi udara yang miskin (*lean*) $\Phi < 1$. Untuk kondisi equilibrium maka $\Phi = 1$.

2.3 Partially Premixed Combustion

Partially premixed combustion merupakan *premixed flames* dengan campuran *fuel-oxidizer* yang tidak seragam (*equivalence ratios*). Pada kesetimbangan kimia dan model *Steady Diffusion Flamelet partially -premixed*. Mengasumsikan bahwa api premixed bagian depan sangat tipis. *Partially premixed combustion* terjadi dari pencampuran antara reaktan yang terbakar dan yang belum terbakar. Komposisi dari hasil pembakaran dapat dimodelkan dengan mengasumsikan kesetimbangan kimia atau dengan *steady laminar diffusion flamelet*. *Flame brush* dapat diindikasikan oleh nilai dari rata-rata reaksi C^- diantara 0 dan 1. Dengan *premixed flame brush* yang turbulen dengan nilai $0 < C^- < 1$, untuk api tipis yang berfluktuasi terjadi pada kondisi tidak terbakar ($C=0$) Dan pada saat terbakar ($C = 1$), dengan rata-rata progress reaksi diantara 0 dan 1 (A. K. Gupta, dkk 1984).



Gambar 2.3 Skema *Partially Premixed Combustion*
(Kushari, P.A. 2016)

2.4 Aliran *swirl* Pada Sistem Pembakaran

Aspek utama dalam sistem pembakaran untuk mencapai efisiensi, kestabilan, dan *noise* yang kecil. Semakin tinggi efisiensi pembakaran akan ada penghematan energi dan meminimalisir polusi lingkungan yang disebabkan oleh NO_x dan CO₂. Untuk mencapai kriteria tersebut terdapat tiga aspek penting yaitu waktu, temperature, dan turbulensi. Turbulensi terdapat di dua zona, yaitu dimana bahan bakar dan udara dicampur dan dimana bahan bakar saat terbakar. tingginya turbulensi dapat dicapai dengan adanya *bluff bodies*, yang mana umumnya digunakan untuk pembakaran tipe *premixed*, atau dengan adanya *swirler*. Disisi lain, turbulensi tinggi mungkin menyebabkan level *noise* tinggi selama pembakaran.

Metode pembangkitan *swirl* yang umum digunakan adalah *inlet* multi-jet tangensial dan perbedaan tipe *swirler*. Zona resirkulasi terbentuk dalam aliran ketika gradien tekanan aksial yang merugikan melebihi energi kinetik dari partikel-partikel cairan, sedangkan titik-titik stagnasi terbentuk. Ini bisa terjadi dibawa oleh pusaran kuat ke jet. Zona resirkulasi seperti ini disebut "*Central Toroidal Recirculation*". Juga, ekspansi aliran tiba-tiba masuk ke dalam ruang bakar menciptakan jenis lain dari zona resirkulasi yang disebut "*Corner Recirculation Zone*". Faktor utama yang mempengaruhi keberadaan zona resirkulasi dan ukuran dan bentuknya adalah kekuatan pusaran, sudut baling-baling berputar, dan rasio diameter ruang untuk pembakar.

Terdapat tiga metode utama dalam pembangkitan *swirl* menurut (A. K. Gupta, dkk 1984).:

- Tangensial *inlet* (aksial dan tangensial inlet *swirl* generator)
- *Guided vanes swirlers*.
- Rotasi langsung (pipa rotasi)

Efek dari *swirl* pada jet-jet turbulensi axi-simetris telah diselidiki oleh (N. M. Ken-, & D. Fraser, 1965) melalui

pengukuran kecepatan dengan cara pitot tiga dimensi pada ukuran penuh *furnace* burner, di mana udara pembakaran dibagi menjadi aliran primer dan sekunder. Aliran utama berputar-putar oleh sudu (*vanes*) *swirler*, sementara aliran sekunder melewati slot miring di kepala burner. Teoritis perhitungan berdasarkan teori *swirlingjet*, di mana bilangan *swirl* didefinisikan sebagai:

$$S = 2/3 [(1-Z^3)/(1-Z^2)] \tan \theta \dots\dots\dots(2.5)$$

Dimana Z adalah perbandingan antara dh/d , θ adalah sudut *vane*.

Pada *swirler* tipe tangensial *inlet* bilangan *swirl* didefinisikan sebagai berikut :

$$S = \frac{G_t}{R.G_x} = \frac{\int_0^\infty u_x u_t r^2 dr}{R \cdot \int_0^\infty u_x^2 r dr} \dots\dots\dots(2.6)$$

Dimana G_t merupakan perbandingan antara *axial flux* dari *swirl momentum*, sedangkan G_x adalah axial flux dari axial momentum. Variabel u_x , u_t , dan r masing-masing menunjukkan komponen kecepatan aksial, kecepatan tangensial, dan jarak radial.

2.5 Computational Fluids Dynamics

Computational fluid dynamics (CFD) adalah sebuah metode untuk mensimulasikan perilaku suatu sistem yang melibatkan aliran fluida, perpindahan panas dan proses fisik lainnya. Atas prinsip-prinsip dasar mekanika fluida, konservasi energi, momentum, massa, serta species, penghitungan dengan CFD dapat dilakukan. Secara sederhana proses penghitungan yang dilakukan oleh aplikasi CFD adalah dengan kontrol-kontrol penghitungan yang telah dilakukan maka kontrol penghitungan tersebut akan dilibatkan dengan memanfaatkan persamaan-persamaan yang terlibat. Persamaan-persamaan ini adalah persamaan yang dibangkitkan dengan memasukkan parameter apa saja yang terlibat dalam domain. Misalnya ketika suatu model yang akan dianalisa melibatkan suhu berarti model tersebut melibatkan persamaan energi atau konservasi dari energi tersebut. Inisialisasi awal dari persamaan disebut *boundary condition*. *Boundary condition* adalah kondisi dimana kontrol-kontrol perhitungan didefinisikan sebagai

definisi awal yang akan dilibatkan ke kontrol-kontrol penghitungan yang berdekatan dengannya melalui persamaan-persamaan yang terlibat (Tuakia,F. 2008).

Hasil yang didapat pada kontrol point terdekat dari penghitungan persamaan yang terlibat akan diteruskan ke kontrol point terdekat lainnya secara terus menerus hingga seluruh domain terpenuhi. Akhirnya, hasil yang didapat akan disajikan dalam bentuk warna, vektor dan nilai yang mudah untuk dilihat dengan konfigurasi jangkauan diambil dari nilai terbesar dan terkecil.

Secara umum proses penghitungan CFD terdiri atas 3 bagian utama:

- a. *Pre-processor (Input)*
- b. *Processor*
- c. *Post-processor (Output)*

Pre-pocessor adalah tahap dimana data dimasukkan mulai dari pendefinisian domain serta pendefinisian kondisi batas atau *boundary condition*. Ditahap itu juga sebuah benda atau ruangan yang akan analisa dibagi-bagi dengan jumlah grid tertentu atau sering disebut juga dengan *meshing*. Tahap selanjutnya adalah *processor*, pada tahap ini dilakukan proses penghitungan data-data input dengan persamaan yang terlibat secara iteratif. Artinya penghitungan dilakukan hingga hasil menuju error terkecil atau hingga mencapai nilai yang konvergen. Penghitungan dilakukan secara menyeluruh terhadap volume kontrol dengan proses integrasi persamaan diskrit. Tahap akhir merupakan tahap *postprocessor* dimana hasil perhitungan diinterpretasikan ke dalam gambar, grafik bahkan animasi dengan pola-pola warna tertentu.

2.6 Large Eddy Simulation

Large Eddy Simulation merupakan salah satu turbulen model yang mana juga berhubungan pada teori Kolmogorov (F, 2001) dan (Jiang, X., & Lai, C. H, 2016). Teori ini mengasumsikan bahwa aliran large eddied bergantung pada geometri dari aliran, sementara itu untuk smaller eddies sama dan memiliki *property* yang biasa.

LES hanya menghitung *Large eddies* secara eksplisit, dimana *Smaller eddies* akan dimodelkan. Dalam LES, perpindahan pola aliran dalam skala besar di hitung dengan menggunakan metode yang sama dengan DNS, sementara itu pengaruh dari *subgrid scale* akan di modelkan menggunakan model *subgrid scale* (SGS).

Governing equation dari model LES (*Large Eddy Simulations*) ter-filter secara spasial. Pada aliran *compressible* dan aliran yang bereaksi menggunakan *filter density-weighted* (Favre).

$$\tilde{Q}(x, t) = \frac{\bar{\rho} \tilde{Q}}{\bar{\rho}} \dots \dots \dots (2.7)$$

Dengan menerapkan spasial filter *density weighted* kedalam *governing equation* dari aliran reaktif turbulen menghasilkan persamaan untuk LES, misalnya untuk persamaan *transport* dari Fraksi massa spesies,

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{Y}_k}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{Y}_k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{Y}_k - \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{Y}_k - \frac{\partial \tilde{J}_{k,i}}{\partial x_i} \right) + \bar{\rho} \tilde{\omega}_k \dots \dots \dots (2.8)$$

Dengan mengacu pada penelitian Jones, dkk (2012) *sub-grid scalar flux* dan *sub-grid stress* (untuk persamaan momentum) di modelkan menggunakan model Smagoronsky. Untuk *Scalar flux*,

$$\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{Y}_k - \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{Y}_k = \frac{\mu_{SGS}}{\sigma_{SGS}} \frac{\partial \tilde{Y}_k}{\partial x_i} \dots \dots \dots (2.9)$$

Dimana \tilde{Y}_k adalah *Sensible Enthalpy*, μ_{SGS} merupakan *subgrid viscosity*, dan σ_{SGS} adalah Schmidt/Prandtl Number.

Terdapat perbedaan antara pemodelan menggunakan LES dan RANS. Dalam RANS, pemodelan selesai berdasarkan pada waktu atau deret dari persamaan dasar yang dirata-rata. Sehingga, mengakibatkan RANS tidak dapat mengambil gambar aliran

unsteady dan perubahan aliran dalam skala kecil. Rata-rata dari nilai fluktuasi adalah nol, dengan kata lain $(u')^- = 0$. Dalam LES, persamaan dasar yang terfilter secara terpisah bukan merupakan hasil dari waktu rata-rata. Struktur aliran lebih besar dari pada lebar dari filter yang akan dikalkulasi secara eksplisit. Sedangkan untuk efek skala yang tidak bisa dipecahkan akan dimodelkan dengan menggunakan model SGS.

Dapat disimpulkan bahwa sebagian besar energi ada di vortex yang lebih besar dan vortex yang lebih kecil memiliki sifat yang lebih khas dan kurang penting dan harus lebih mudah dalam pemodelan. Nilai komponen berskala kecil tidak lagi nol dengankata lain $(u')^- \neq 0$. Dalam prakteknya LES dapat memprediksi struktur vertical dari aliran *unsteady* (F, 2001).

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

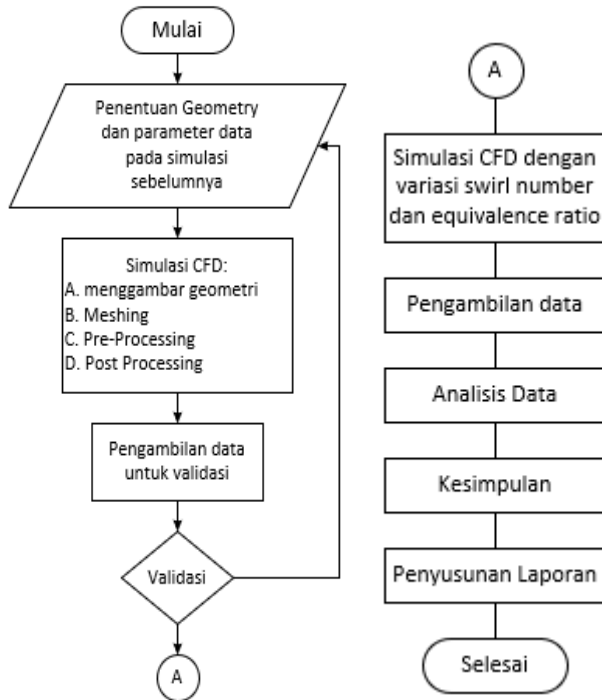
3.1 Diagram Alir Penelitian

Pada penelitian tugas akhir ini memuat topik pembakaran pada turbin gas, dengan penerapan konsep *Partially Premixed Combustion* dan pengaruh dari *swirl number* pada ruang pembakaran yang digunakan oleh LG Becker, dkk (2017). Dengan tujuan untuk mengetahui performansi yang lebih baik dibandingkan dengan pembakaran konvensional, penelitian ini dilaksanakan sebagaimana seperti alur penelitian yang ditunjukkan pada gambar 3.1. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan software komputasi CFD, dimana pada tahap awal perlu dilakukan desain untuk ruang pembakaran yang dimiliki turbin gas. Pemodelan reaksi pembakaran pada ruang pembakaran dengan mengikuti rezim pembakaran *Partially Premixed Combustion* dengan pendekatan ruang pembakaran turbin gas. Besarnya nilai *swirl number* digunakan sebagai variasi penelitian ini, divariasikan mulai dari 0,47, 0,57, 0,67, dan 0,77. Dimana *swirl number* dengan nilai 0,47 dengan *equivalence ratio* sama dengan 1 dilakukan untuk validasi simulasi terhadap penelitian secara eksperimen yang dilakukan oleh LG Becker, dkk (2017).

Penelitian tugas akhir ini memiliki 4 variasi utama *swirl number* yang masing-masing variasi memiliki 3 subvariasi *equivalence ratio* dengan nilai *equivalence ratio* sebesar 1,6, 1,97, dan 2,4 dengan komposisi oksidizer masing-masing *swirl number* memiliki oksidizer 100% udara, 25% O₂ dan 75% CO₂, dan 30% O₂ dan 70% CO₂. Adanya variasi oksidizer berhubungan dengan hasil yang akan didapat, yaitu dengan keadaan NO_x yang akan dihasilkan. Pemilihan subvariasi tersebut berdasarkan penelitian eksperimental (Becker, L.G., 2017) dan variasi *swirl number* dengan interval antar variasi nilai *swirl number* sebesar 0.1.

Pemodelan reaksi pembakaran *partially premixed combustion* dilakukan menggunakan metode numerik *Computational Fluid*

Dynamics (CFD) yang terdapat pada perangkat lunak FLUENT ANSYS. Dari pemodelan melalui perangkat lunak tersebut akan didapatkan distribusi suhu dan NO_x(ppm) terhadap besarnya *swirl number* dengan representasi tiap tiga *equivalence ratio* dari hasil reaksi pembakaran.



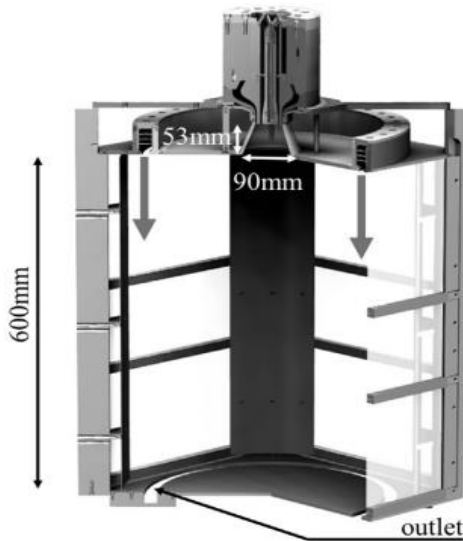
Gambar 3.1 Skema diagram alir penelitian Tugas Akhir

3.2 Pengumpulan Data

Adapun data-data yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

- Data desain ruang pembakaran berdasarkan data pada penelitian L.G Becker dkk (2017).
- Data komposisi bahan bakar dan *oxidizer* berdasarkan penelitian L.G Becker dkk (2017).

Pada tugas akhir ini, digunakan geometri desain *combustion chamber* dari penelitian berbasis eksperimen yang dilakukan pada L.G. Becker (2017). Pada eksperimen tersebut digunakan model *combustion chamber* dengan menggunakan *conical quarl* dengan Panjang *combustor* 600 mm dan lebar melintang 420 x 420 mm². *Combustion chamber* ini memiliki 3 saluran keluaran, tiap keluaran berbentuk cincin keluaran pertama merupakan keluaran *oxy-fuel* dan 2 keluaran lainnya merupakan keluaran *oxidizer*.



Gambar 3.2 Desain *combustion chamber* (Becker,L.G., 2017)

Combustion chamber ini memiliki Panjang 600 mm yang dilengkapi *quarl* pada sisi *nozzle* dengan bentuk *conical* yang memiliki sudut *cone* sebesar 21° dan diameter pada sisi ujung sebesar 90 mm dan Panjang 53 mm.

Data-data seperti *primary equivalence ratio* yang saling berkaitan diantara keduanya dengan *primary* merupakan

equivalence ratio pada campuran bahan bakar dan udara sebelum adanya penambahan *oxidizer* sedangkan *total equivalence ratio* merupakan *equivalence ratio* bahan bakar udara total yaitu antara primer dan adanya penambahan *oxidizer*, kecepatan pada inlet, *Adiabatic Flame Temperature* sebagai data validasi dan komposisi oxydizer yang didapatkan digunakan sebagai nilai kondisi awal burner yang dimana komposisi Oxydizer terdiri dari 100% Air dengan *primary* dan *total equivalence ratio* sebesar 1.6 dan 0.64, 25 vol% O₂ dan 75 vol% CO₂ dengan *primary* dan *total equivalence ratio* sebesar 2.4 dan 0.91, 30 vol% O₂ dan 70 vol% CO₂ dengan *primary* dan *total equivalence ratio* sebesar 1.97 dan 0.75. Pengondisian komposisi *oxidizer* ini dikarenakan untuk menjaga agar *axial momentum* dijaga tetap di setiap *swirl number*nya (Becker, L.G. 2017). pemilihan nilai *primary equivalence ratio* dengan nilai diatas satu atau dengan kata lain dapat dikategorikan pembakaran dengan bahan bakar *rich fuel* dikarenakan telah menjadi syarat pada model pembakaran *partially premixed* ini.

Data-data tersebut disajikan pada tabel sebagai berikut :

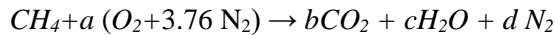
Tabel 3.1 Data operating condition

| Swirl Number | Equivalence Ratio | Mole Fractions | |
|--|-------------------|--------------------------|------------------------|
| | | Primary inlet | Oxidizer Inlet |
| a. 0,47 b. 0,57 c. 0,67 d. 0,77 | 1,6 | CH ₄ : 0,144 | O ₂ : 0,21 |
| | | Air : 0,856 | CO ₂ : 0,79 |
| | 1,97 | CH ₄ : 0,1717 | O ₂ : 0,30 |
| | | Air : 0,8283 | CO ₂ : 0,70 |
| | 2,4 | CH ₄ : 0,2015 | O ₂ : 0,25 |
| | | Air : 0,7985 | CO ₂ : 0,75 |

3.3 Perhitungan Rasio Bahan Bakar dan Udara

Untuk menentukan rasio antara bahan bakar dan udara pada proses pembakaran awal pada combustion chamber maka dilakukan perhitungan berdasarkan persamaan reaksi stokiometri sebagai berikut :

Persamaan reaksi stokiometri adalah sebagai berikut :

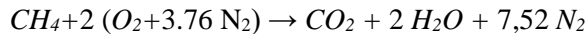


Lalu dilakukan kalkulasi untuk mencari nilai dari a, b, c , dan d sebagai berikut :

$$\begin{array}{ll} C \rightarrow 1=b & O \rightarrow 2a = 2b + c \\ H \rightarrow 4=2c & 2a = 2(1) + 2 \\ c = 2 & 2a = 4 \\ & \dots a = 2 \end{array}$$

$$\begin{array}{l} N \rightarrow 3,76(2)a = 2d \\ 3,76(2)(2) = 2 \cdot d \\ d = 7,52 \end{array}$$

Didapatkan nilai dari koefisien a, b, c , dan d masing-masing 2, 1, 2, dan 7,52. Sehingga didapatkan perseamaan reaksi sebagai berikut :



Dari persamaan reaksi diatas maka didapatkan hasil perbandingan massa gas dengan udara melalui perhitungan sebagai berikut :

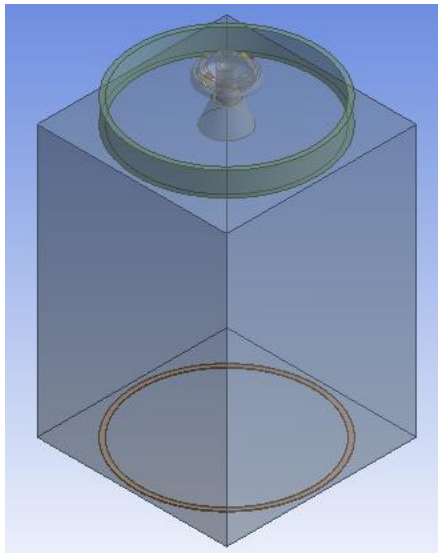
$$\begin{aligned} \left(\frac{F}{A}\right)_{stoic} &= \frac{1}{2(1 + 3,76)} \\ \left(\frac{F}{A}\right)_{stoic} &= \frac{1}{9,52} \\ \left(\frac{F}{A}\right)_{stoic} &= 0,105 \frac{kg CH_4}{kg udara} \end{aligned}$$

3.4 Pemodelan Reaksi *Partially Premixed Combustion* menggunakan metode *Computational Fluid Dynamic*

Pemodelan reaksi *Partially premixed combustion* yang terjadi pada *burner* menggunakan metode numerikal CFD (*Computational Fluid Dynamic*). Adapun langkah-langkah pemodelan *partially premixed combustion* dapat dijelaskan sebagai berikut.

a. Pembuatan geometri *burner*

Pembuatan geometri *burner* bertujuan sebagai representasi domain fluida dari *burner* yang dibuat berdasarkan *detail drawing* yang terdapat pada L.G. Becker, dkk (2017). Pada geometri terdapat 3 aliran yang keluar melalui nozzle, aliran pertama merupakan aliran dari oxidizer dan fuel dengan diameter 17 mm dari pusat burner, lalu aliran kedua dan ketiga merupakan aliran dari oxidizer. Pada aliran ke dua yang memiliki diameter 24,6 mm terdapat dua saluran yaitu aliran pada *straight channels* dan aliran pada *inclined channels*.



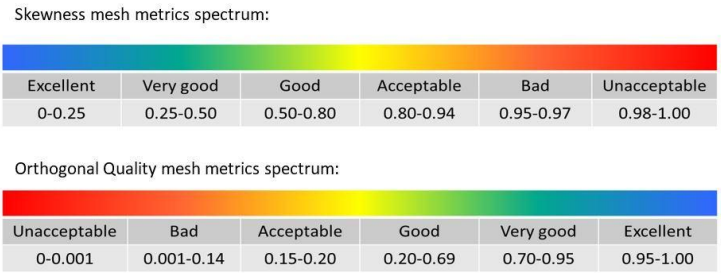
Gambar 3.3 Domain fluida pada *Burner*

b. Meshing

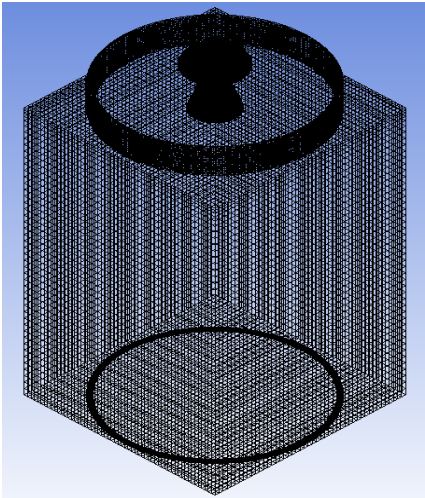
Meshing merupakan pembagian geometri dalam bagian-bagian elemen kecil kontrol volume. Pada tiap-tiap elemen ini nantinya akan dilakukan perhitungan berbagai persamaan matematis seperti konservasi massa, energi, dan momentum. Kualitas mesh yang dihasilkan dari proses meshing sangat menentukan seberapa valid hasil simulasi. Terdapat beberapa parameter untuk menentukan baik tidaknya kualitas mesh. Pada penelitian tugas akhir ini, digunakan dua parameter yaitu *skewness* dan *orthogonal quality*. Kedua parameter tersebut, nilai *skewness* dikatakan sangat baik jika nilainya mendekati 0 dan *orthogonal quality* dapat dikatakan sangat baik jika nilainya mendekati 1 sesuai pada gambar 3.4. Pada penelitian tugas akhir ini didapat nilai *skewness* dan *orthogonal quality* masing-masing adalah 0.6115 dan 0.3885.

| Quality | |
|--|--------------------|
| Check Mesh Quality | Yes, Errors |
| <input type="checkbox"/> Target Skewness | Default (0.900000) |
| Smoothing | High |
| Mesh Metric | Skewness |
| <input type="checkbox"/> Min | 3.5112e-008 |
| <input type="checkbox"/> Max | 0.61115 |
| Quality | |
| Check Mesh Quality | Yes, Errors |
| <input type="checkbox"/> Target Skewness | Default (0.900000) |
| Smoothing | High |
| Mesh Metric | Orthogonal Quality |
| <input type="checkbox"/> Min | 0.38885 |
| <input type="checkbox"/> Max | 1. |

Gambar 3.4 Hasil kualitas *skewness* dan *orthogonal*



Gambar 3.5 kriteria kualitas *skewness* dan *orthogonal*



Gambar 3.6 Contoh hasil *meshing*

c. *Setup* simulasi

Selanjutnya dilakukan penamaan untuk menentukan bagian mana yang menjadi *inlet fuel*, *inlet oxidizer*, *outlet*, dan *wall*. Setelah dilakukan penamaan selanjutnya menentukan *boundary condition*. Pemilihan kondisi batas harus tepat agar mendapatkan hasil yang valid. Kondisi batas harus sesuai dengan kondisi batas yang terdapat pada paper L.G Becker (2017) yang telah menjadi paper rujukan utama penelitian tugas akhir ini. Kondisi batas yang digunakan telah di paparkan pada Tabel 3.3. dengan

persamaan turbulensi yang digunakan sesuai dengan judul yaitu *large eddy simulation*. Pemilihan persamaan ini berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Jiang, X., dan Lai, C. H (2016). Dari penelitian tersebut didapat bahwa metode Large eddy simulation (LES) yang dapat mengatasi berbagai keterbatasan yang terdapat pada metode RANS yang dimana metode RANS memiliki beberapa keterbatasan seperti simulasi hanya dapat dilakukan pada keadaan skala besar, struktur turbulen yang tidak stasioner, streamline curvature, dan non-gradient transport.

Tabel 3.2 *Boundary Condition*

| Parameter | Kondisi Batas |
|---------------------------------|------------------------|
| Inlet fuel + oxidizer | <i>Velocity Inlet</i> |
| Inlet inclined channel oxidizer | <i>Velocity Inlet</i> |
| Inlet straight channel Oxidizer | <i>Velocity Inlet</i> |
| Outlet | <i>Pressure Outlet</i> |

Tabel 3.3 *Persamaan Turbulen*

| <i>Large eddy simulation - WALE</i> | |
|--|-------------------------------------|
| <i>Pressure Velocity coupling</i> | <i>SIMPLE</i> |
| <i>Pressure</i> | <i>Second order</i> |
| <i>Momentum</i> | <i>Bounded central differencing</i> |
| <i>Energy</i> | <i>Second Order Upwind</i> |
| <i>Pollutant NO</i> | <i>Second Order Upwind</i> |
| <i>Progress variable</i> | <i>Second Order Upwind</i> |

Setelah tahap penentuan domain, dan persamaan turbulensi selesai, maka tahap selanjutnya adalah melakukan iterasi dari data input tersebut. Iterasi yang dilakukan berdasarkan persamaan dasar dinamika fluida pada metode numerikal *Computational Fluid Dynamic*. Pada tahap ini dilakukan iterasi sampai hasil yang diperoleh konvergen dan

mendapatkan hasil validasi yang baik. Hasil yang konvergen dapat diketahui dengan nilai RMS untuk nilai *x-velocity*, *y-velocity*, *z-velocity*, *energy*, *fmean*, *partially premixed*, dan *pollutant NOx* dibawah $1e-03$. Setelah proses iterasi selesai, maka akan diperoleh hasil simulasi berupa profil distribusi suhu, dan *pollutant NOx* yang dihasilkan.

BAB IV

ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1. Validasi Hasil Simulasi CFD

Validasi data adalah salah satu proses penting dalam simulasi yang digunakan sebagai cara yang dilakukan untuk menemukan hasil simulasi yang mendekati keadaan aktual. Sehingga dalam proses validasi ini akan dicapai kesesuaian hasil simulasi dengan kondisi sebenarnya. Ada berbagai cara yang dapat dilakukan untuk validasi, contohnya seperti *grid independency*, error parameter hasil simulasi yang dibandingkan dengan hasil eksperimen, dan lain – lain. Pada penelitian tugas akhir ini digunakan validasi data dengan hasil penelitian eksperimen yang telah dilakukan oleh L.G. Becker, dkk (2017). dimana variabel yang digunakan sebagai validasi adalah data *adiabatic flame temperature* pada *equivalence ratio* sama dengan satu.

Berikut merupakan tabel hasil validasi simulasi yang dilakukan :

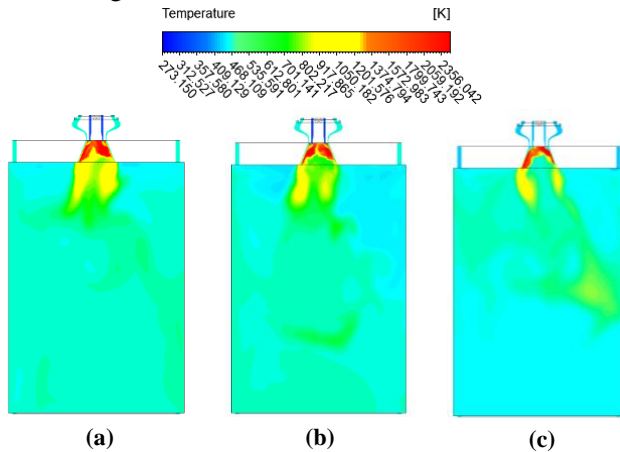
Tabel 4.1 Hasil Validasi dengan data eksperimental

| No. | Variasi ϕ | <i>Adiabatic Flame Temperature (K)</i> | | Error (%) |
|------------------------|-------------------|--|----------|--------------|
| | | Eksperimen | Simulasi | |
| 1. | 1,6 | 2219 | 2383.75 | 7.42452 |
| 2. | 1,97 | 2220 | 2366.43 | 6.59595 |
| 3. | 2,4 | 2175 | 2356.43 | 8.34161 |
| Error rata-rata | | | | 7.45402 |

Pada ketiga variasi *equivalence ratio* didapat bahwa *error* masing-masing dengan variasi *equivalence ratio* sebesar 1,6, 1,97, dan 2,4 adalah sebesar 7,42452 %, 8,34161%, dan 6,59595%. Sehingga diperoleh *error* rata-rata dari keseluruhan sebesar 7,45402 %.

Nilai *adiabatic flame temperature* masing-masing variasi didapat saat kondisi ideal dimana pembakaran terjadi pada *equivalence ratio* sama dengan satu.

Distribusi *temperature* pada data validasi yaitu dimana kondisi *equivalence ratio* sama dengan 1 atau dapat disebut reaksi pembakaran ini pada saat kondisi ideal sesuai dengan keadaan *stoichiometric*. Reaksi pembakaran pada saat *equivalence ratio* sama dengan satu ini dapat menjadi acuan untuk variasi *equivalence ratio* sebesar 1,6, 1,97, dan 2,4. Dimana pemilihan variasi ini sesuai dengan penelitian L.G. Becker, dkk (2017), dan secara teoretis telah menjadi syarat bahwa *partially premixed combustion* mengharuskan memiliki nilai *equivalence ratio* lebih besar atau sama dengan satu.



Gambar 4.1 Kontur *temperature* data validasi pada *equivalence ratio* (a) 1,6 (b) 1,97 dan (c) 2,4

Kontur *temperature* dari hasil simulasi data validasi memiliki kecenderungan kontur yang hampir sama dimana *flame point* terjauh berada disekitar radius Y sejauh 0.05 m. Dimasing-masing tiga variasi validasi dengan *temperature flame* masing-masing sebesar 2383,75 K, 2356,43 K, dan 2366,43K ketiganya cenderung mengalami penurunan *temperature* yang signifikan yaitu

disekitar 463.536 K. *Flame* yang terjadi dominan terletak disekitar sisi *burner* yang berbentuk quarl.

Sesuai dengan jurnal milik oberkampff, W.L. dan Trucano, T.G., (2002) mengatakan bahwa proses validasi ini dianggap sudah valid ketika selisih error yang telah dibandingkan dengan data eksperimen kurang dari 10%. Sehingga, hal ini menunjukkan bahwa penelitian tugas akhir ini telah tervalidasi.

4.2. Data Hasil Simulasi Reaksi Pembakaran

Dalam penelitian tugas akhir ini, akan dibahas beberapa data yang didapatkan dari simulasi CFD yaitu data kuantitatif berupa data temperatur dan data polutan NO_x, sedangkan pola distribusi kontur akan direpresentasikan menjadi pola distribusi *temperature* dan pola distribusi kecepatan. Pola distribusi *temperature* berguna untuk mengetahui persebaran *flame temperature* serta perubahannya terhadap jarak axial, sedangkan pola distribusi kecepatan diketahui untuk melihat perbedaan pola aliran kecepatan pada setiap *swirl number*. Setiap data dan pola distribusi aliran merupakan distribusi aliran pada waktu ke 20 detik karena pada waktu inilah setiap pembakaran telah mencapai titik steady.

Berdasarkan hasil perhitungan analisis reaksi pembakaran pada subbab 3.3 didapatkan nilai fraksi mol komposisi bahan bakar dan *oxidizer* pada setiap inlet, dimana nilai fraksi mol tersebut digunakan untuk input inisialisasi pada *setup* simulasi CFD. Pada proses terakhir yaitu *postprocessing* didapatkan beberapa data simulasi CFD berupa profil distribusi suhu dan nilai emisi gas NO_x yang dihasilkan.

4.2.1. Pengaruh *Swirl Number* terhadap Temperature dan polutan

Temperatur dan polutan merupakan salah satu variabel penting yang perlu ditinjau dalam penelitian mengenai pembakaran ini, representasi pengaruh temperature terhadap perubahan *swirl number* di setiap tiga *equivalence ratio* yang telah ditetapkan sesuai dengan penelitian L.G. Becker, dkk (2017). Karena disetiap *equivalence ratio* 1,6, 1,97, dan 2,4 memiliki kandungan *oxidizer*

berbeda masing- masing 100% udara, 25% O₂ dan 75% CO₂, dan 30% O₂ dan 70% CO₂ sehingga data dianalisa secara terpisah disetiap *swirl number*.

Secara teoretis sesuai dengan penelitian S.B. Ouali (2014). mengenai pengaruh *equivalence ratio* metana dan udara terhadap temperature yang dihasilkan menyatakan bahwa *Temperature* tertinggi terdapat pada *equivalence ratio* sama dengan satu, semakin meningkatnya nilai *equivalence ratio* dari nilai satu maka akan menurunkan temperature dikarenakan semakin besarnya *equivalence ratio* akan menurunkan komposisi udara baik O₂ maupun N₂ dalam suatu reaksi pembakaran.

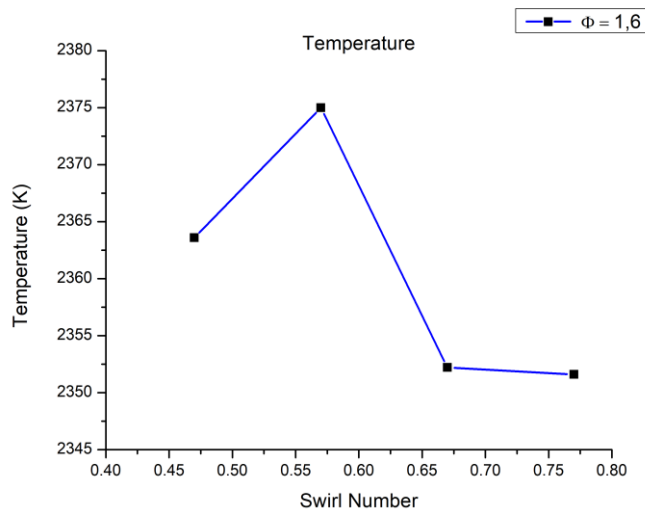
Dengan total 3 simulasi sebagai data validasi dan 12 variasi, didapatkan hasil sebagaimana tertera pada tabel 4.2 sebagai berikut:

Tabel 4.2 Data Hasil temperature dan NOx disetiap variasi

| No. | <i>Swirl Number</i> | <i>Equivalence Ratio</i> | <i>Temperature (K)</i> | NOx (ppm) |
|-----|---------------------|--------------------------|------------------------|------------------|
| 1 | 0.47 | 1 | 2383.75 | 68.983 |
| 2 | 0.47 | 1 | 2356.43 | 27.135 |
| 3 | 0.47 | 1 | 2366.43 | 30.332 |
| 4 | 0.47 | 1.6 | 2363.62 | 68.981 |
| 5 | 0.47 | 2.4 | 2237.35 | 17.505 |
| 6 | 0.47 | 1.97 | 2309.72 | 23.419 |
| 7 | 0.57 | 1.6 | 2375.12 | 85.752 |
| 8 | 0.57 | 2.4 | 2230.01 | 16.064 |
| 9 | 0.57 | 1.97 | 2319.55 | 32.612 |
| 10 | 0.67 | 1.6 | 2352.21 | 83.254 |
| 11 | 0.67 | 2.4 | 2213.19 | 13.732 |
| 12 | 0.67 | 1.97 | 2310.71 | 17.518 |
| 13 | 0.77 | 1.6 | 2351.61 | 82.438 |
| 14 | 0.77 | 2.4 | 2249.02 | 14.219 |
| 15 | 0.77 | 1.97 | 2316.81 | 18.338 |

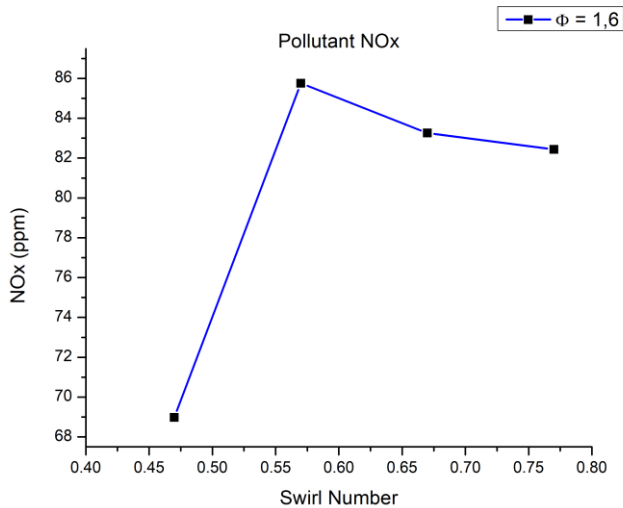
- a. Pengaruh *swirl number* terhadap temperature dan polutan pada *Equivalence Ratio* 1,6

Pada variasi pertama dengan *swirl number* sama dengan 0,47 terdapat tiga subvariasi berupa *equivalence ratio* sama dengan 1,6, 1,97, dan 2,4. Pada bagian ini akan dibahas hasil dari variasi *Equivalence ratio* sama dengan 1,6 yang memiliki *oxidizer* berupa 100% udara, hasil berupa data *flame temperature* dipaparkan kedalam bentuk grafik pada gambar 4.2 sebagai berikut,



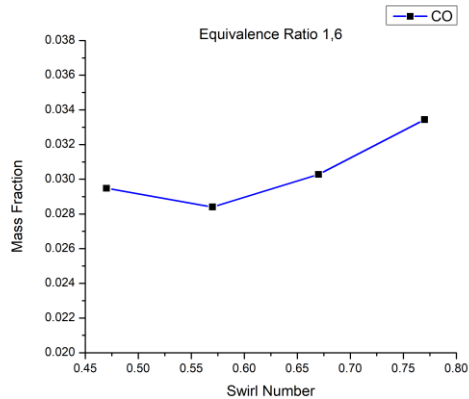
Gambar 4.2 Grafik temperature terhadap *swirl number* pada *equivalence ratio* 1,6

Pada *equivalence ratio* 1,6 temperature maksimum didapat pada *swirl number* sebesar 0,57 yaitu 2375 K. Sedangkan, pada *swirl number* sebesar 0,77 didapatkan *temperature* paling rendah yaitu sebesar 2351,6 K.



Gambar 4.3 Grafik polutan NOx terhadap *swirl number* pada *equivalence ratio* 1,6

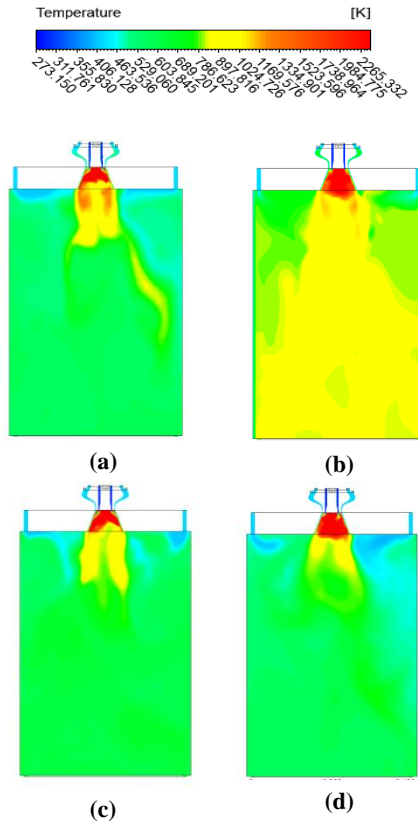
Pada equivalence ratio 1,6 memiliki Pollutan paling tinggi yaitu sebesar 85,75 ppm pada *swirl number* 0,57 dan polutan terendah yang dimiliki oleh swirl number 0,47 sebesar 68,98 ppm. Grafik temperature dan polutan pada gambar 4.2 dan 4.3 cenderung konsisten memiliki kesamaan dimana tiap kenaikan *swirl number* memiliki pola yang sama dimana temperature dan polutan memiliki nilai maksimum pada *swirl number* 0,57 tetapi berbeda untuk nilai minimum dimana terdapat pada *swirl number* 0,47 untuk polutan dan 0,77 untuk *temperature*.



Gambar 4.4 Grafik polutan CO terhadap *swirl number* pada *equivalence ratio* 1,6.

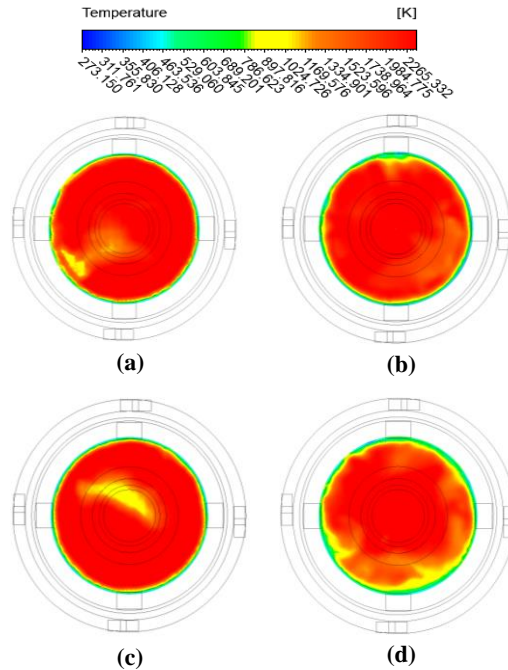
Polutan CO merepresentasikan bahwa suatu pembakaran sempurna atau tidak, semakin sempurna pembakaran maka semakin kecil nilai CO. Karena CO telah dioksidasi kembali sehingga terbentuklah CO_2 . Pada *swirl number* 0,57 memiliki fraksi massa CO terendah yaitu sebesar 0,0284 sehingga dengan dua parameter yaitu CO dan *temperature*, *swirl number* 0,57 merupakan pembakaran terbaik pada *equivalence ratio* 1,6. Dari grafik diatas cenderung menunjukkan bahwa semakin tinggi *temperature* maka semakin kecil nilai CO yang dihasilkan.

Distribusi temperature yang direpresentasikan berupa kontur tertera pada gambar 4.5 sebagai berikut,



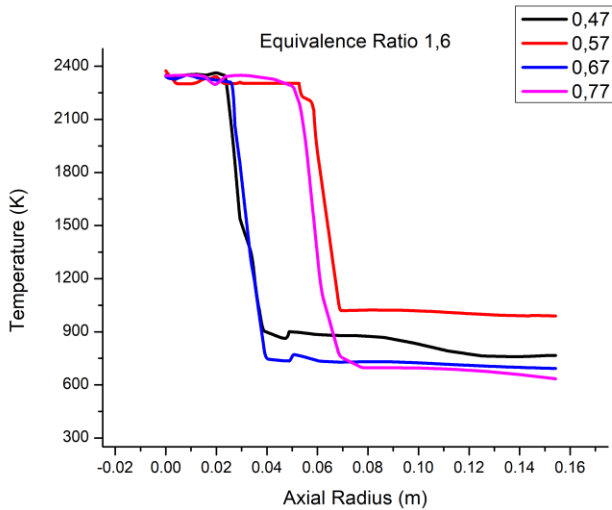
Gambar 4.5 Kontur temperature pada *Equivalence Ratio* dengan *swirl number* (a) 0,47 (b) 0,57 (c) 0,67, dan (d) 0,77

Selanjutnya, dipaparkan kontur *temperature* dimana kontur *temperature* terletak pada bidang ZY bagian *conical quarl*. Sebagai berikut,



Gambar 4.6 kontur temperature penampang melintang pada *equivalence ratio* 1,6. Dengan *swirl number* (a) 0,47 (b) 0,57 (c) 0,67, dan (d) 0,77

Kontur temperature pada *equivalence ratio* 1,6 tersedia dalam dua bidang yaitu pada bidang XY dan bidang ZY, berdasarkan data yang telah didapat temperature tertinggi yaitu pada *swirl number* 0,57. Kontur yang terdapat pada gambar 4.5 dan gambar 4.6 menunjukkan bahwa temperatur pada *swirl number* 0,57 ini lebih dominan pada warna merah, hijau, dan kuning pada kontur bidang XY sedangkan pada bidang ZY kontur *temperature* pada keempat *swirl number* dominan berwarna merah tetapi pada *swirl number* 0,77 masih terdapat warna kuning dan hijau di sekitar dinding burner.



Gambar 4.7 *Temperature axial radius pada equivalence ratio 1,6 dengan variasi empat swirl number.*

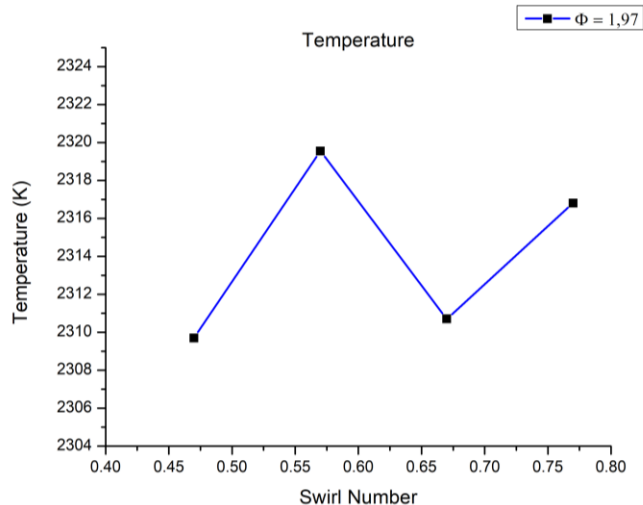
Grafik *temperature* terhadap posisi axial memberikan informasi tambahan dari kontur *temperature* mengenai pola penurunan *temperature* yang terjadi dan keberadaan *temperature* disetiap posisi axial. Grafik ini di representasikan pada bidang XY hanya dari posisi 0 hingga 0,15 m.

Pada *equivalence ratio* 1,6, *flame stagnation point* terjauh terdapat pada *swirl number* 0,57 terletak pada jarak axial sebesar 0.05856 m. hal ini juga dipengaruhi oleh tingginya nilai *temperature* yang terdapat pada *swirl number* 0,57. Sedangkan, pada *swirl number* 0,47 dan 0,67 memiliki *flame stagnation point* yang pendek yaitu sekitar 0,02408 m dan 0,02668 m. tetapi jika dilihat dari pola kontur *temperature* pada bidang ZY, kedua *swirl number* ini cenderung memiliki *flame temperature* yang tinggi lebih menyebar kesekitar dinding burner. Penurunan *temperature* yang terjadi sangat signifikan dikarenakan

pengaruh dari volume *chamber* yang luas dan karakteristik bahan bakar CH_4 yang cenderung memiliki penurunan temperature yang signifikan seperti pada penelitian yang dilakukan oleh I.Yilmaz (2013).

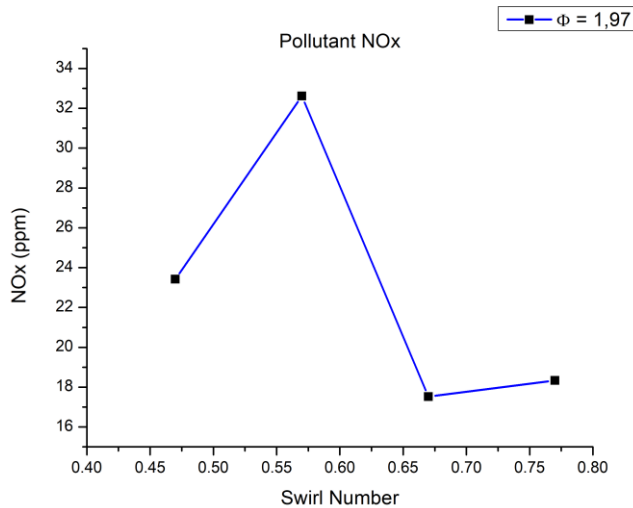
- b. Pengaruh *swirl number* terhadap *temperature* dan polutan pada *equivalence ratio* 1,97

Pada variasi *Equivalence ratio* sama dengan 1,97 memiliki *oxidizer* berupa 30 vol% O_2 dan 70 vol% CO_2 . hasil berupa data *flame temperature* dipaparkan kedalam bentuk grafik pada gambar 4.8,



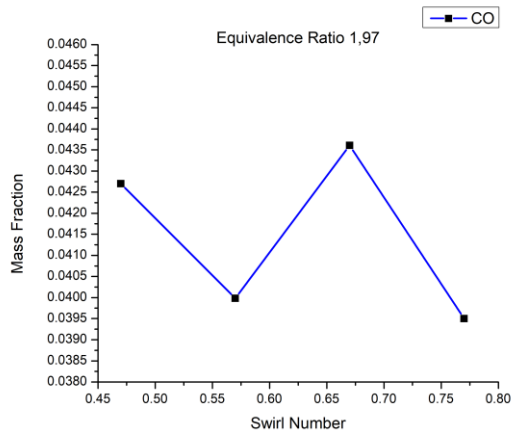
Gambar 4.8 Grafik temperature terhadap *swirl number* pada *equivalence ratio* 1,97

Pada *equivalence ratio* 1,97, *temperature* maksimum dihasilkan pada *swirl number* 0,57 yaitu sebesar 2319,55 K. sedangkan pada *swirl number* 0,47 didapat temperature paling rendah sebesar 2309,7 K. Dari keseluruhan variasi *swirl number*, pada *equivalence ratio* 1.97 memiliki trend naik.



Gambar 4.9 Grafik polutan terhadap swirl number pada equivalence ratio 1,97

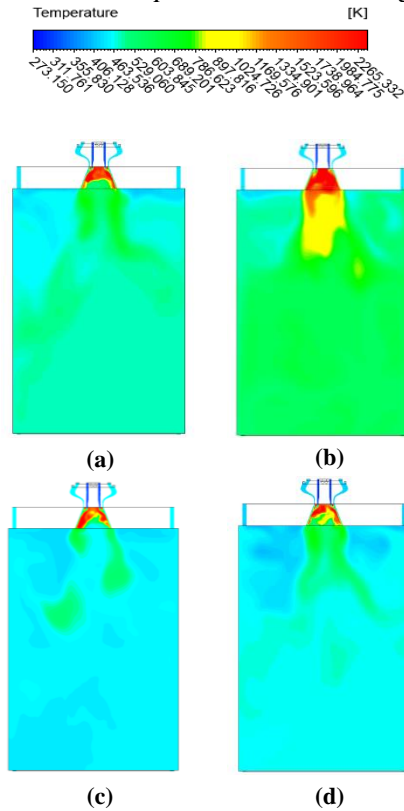
Equivalence ratio 1,97 memiliki nilai polutan tertinggi yaitu pada swirl number 0,57 sebesar 32,612 ppm dan polutan terendah yaitu sebesar 17,518 ppm pada swirl number 0,67. *Equivalence ratio* 1,97 memiliki trend menurun terhadap besarnya swirl number. Grafik *temperature* dan polutan pada gambar 4.8 dan 4.9 cenderung konsisten memiliki kesamaan dimana tiap kenaikan dan penurunan swirl number memiliki pola yang sama dimana *temperature* dan polutan memiliki nilai maksimum pada swirl number 0,57 tetapi berbeda untuk nilai minimum dimana terdapat pada swirl number 0,67 untuk polutan dan 0,47 untuk *temperature*.



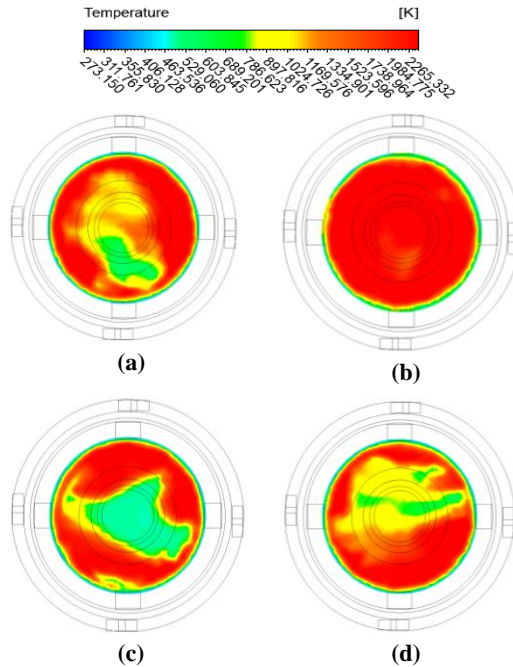
Gambar 4.10 Grafik polutan CO terhadap *swirl number* pada *equivalence ratio* 1,97.

Polutan CO pada *equivalence ratio* 1,97 memiliki pola grafik yang fluktuatif seperti grafik pola *temperature* tetapi berkebalikan. Dengan nilai fraksi massa CO terendah pada *equivalence ratio* 0,77 sebesar 0,0395. Hal ini menunjukkan bahwa pada *swirl number* 0,77 memiliki pembakaran yang paling sempurna diantara *swirl number* lainnya karena memiliki kandungan CO paling rendah dan polutan NOx yang dimiliki *swirl number* ini memiliki polutan yang cukup rendah sebesar sebesar 18,388 ppm.

Distribusi *temperature* yang direpresentasikan kedalam kontur *temperature* tertera sebagai berikut,



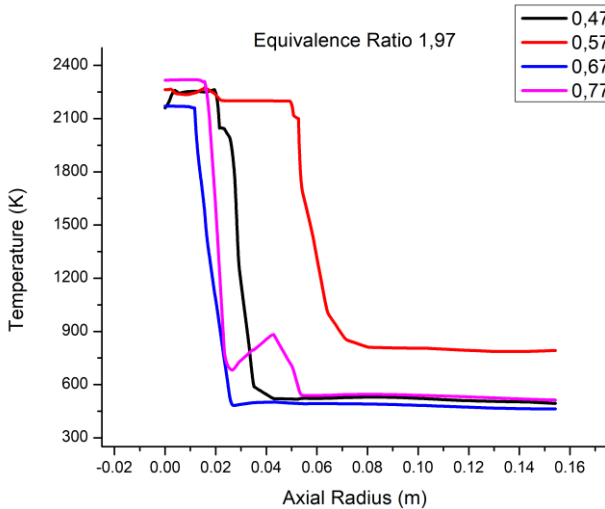
Gambar 4.11 kontur *temperature* pada *Equivalence Ratio* dengan *swirl number* (a) 0,47 (b) 0,57 (c) 0,67, dan (d) 0,77



Gambar 4.12 kontur *temperature* penampang melintang pada *equivalence ratio* 1,6. Dengan *swirl number* (a) 0,47 (b) 0,57 (c) 0,67, dan (d) 0,77

Kontur yang didapat pada variasi *equivalence ratio* 1,97 disetiap variasi *swirl number* memiliki kontur yang dominan berwarna merah pada *swirl number* 0,57. Pada *swirl number* 0,57 memiliki kontur yang panasnya cenderung menyebar yang ditandai dengan dominannya warna hijau dengan *temperature* di sekitar 800 K setelah kontur merah yang menandakan adanya flame. Gradasi warna yang terlihat jelas pada 0,57 memiliki *temperature* tinggi dan yang terendah ada pada *swirl number* 0,47. Pada penampang melintang pada bidang ZY *swirl number* 0,47 dan 0,67 memiliki kontur berwarna hijau di daerah sentral,

hal ini juga dapat disebabkan oleh *temperature* yang rendah tetapi *temperature* tinggi dikedua variasi ini berwarna merah di semua variasi cenderung menyebar disekitar dinding *burner*.

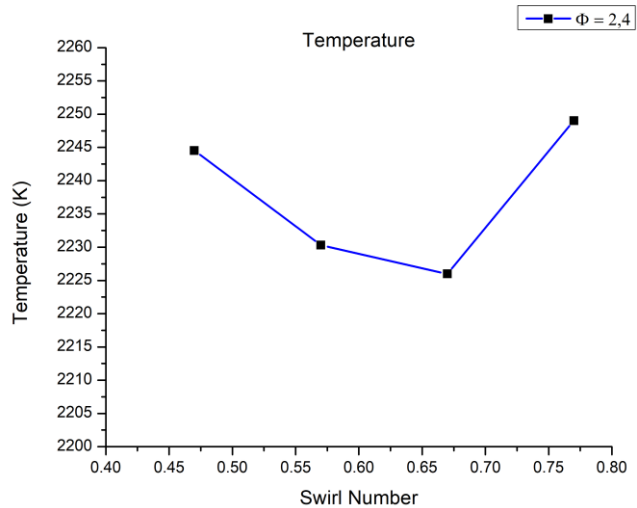


Gambar 4.13 Temperature axial radius pada *equivalence ratio* 1,97 dengan variasi empat *swirl number*.

Grafik *temperature axial radius* pada *swirl number* 0,57 memiliki *stagnation flame point* yang paling jauh diantara variasi *swirl number* lainnya yaitu disekitar 0,05271 m sedangkan *flame stagnation point* paling rendah terdapat pada *swirl number* 0,67 yaitu sebesar 0,01237 m. Hal ini menunjukkan bahwa tingginya *temperature flame* juga akan mempengaruhi *flame stagnation point*. Sama halnya dengan *equivalence ratio* 1,6, juga terjadi penurunan *temperature* yang signifikan.

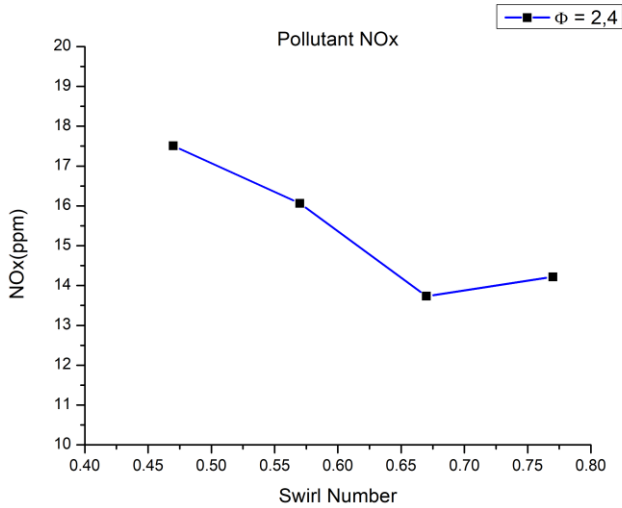
- c. Pengaruh *swirl number* terhadap temperature dan polutan pada *equivalence ratio* 2,4

Pada variasi *equivalence ratio* 2,4. Variasi ini memiliki *oxidizer* berupa 25 vol% O₂ dan 75 vol% CO₂. Hasil berupa data *flame temperature* dipaparkan kedalam bentuk grafik pada gambar 4.14,



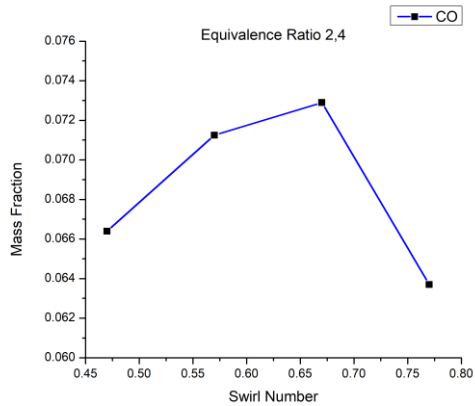
Gambar 4.14 Grafik *temperature* terhadap *swirl number* pada *equivalence ratio* 2,4

Equivalence ratio 2,4 memiliki *Temperature* yang paling rendah jika dibandingkan dengan *equivalence ratio* 1,6 dan 1,97. Pada *equivalence ratio* 2,4, didapat *temperature* maksimum sebesar 2249,02 K pada *swirl number* 0,77 dan *temperature* paling rendah sebesar 2225,99 K pada *swirl number* 0,67. Dari ke empat data yang telah direpresentasikan kedalam grafik, maka didapat pada *equivalence ratio* 2,4 memiliki trend naik.



Gambar 4.15 Grafik polutan terhadap *swirl number* pada *equivalence ratio* 2,4

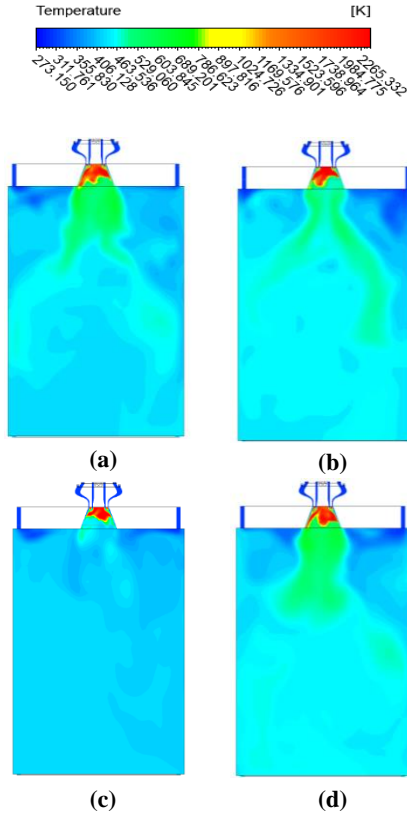
Sedangkan *equivalence ratio* 2,4 memiliki polutan maksimum sebesar 17,5 ppm pada *swirl number* 0,47 dan pada *swirl number* 0,67 memiliki nilai polutan terendah sebesar 13,732 ppm. Pada *equivalence ratio* 2,4 pengaruh besarnya polutan NOx yang dihasilkan terhadap empat variasi *swirl number*, memiliki trend menurun. Dari kedua grafik pada gambar 4.14 dan gambar 4.15 memiliki pola yang konsisten dimana pola naik dan turunnya nilai di kedua variabel baik *temperature* dan polutan cenderung sama.



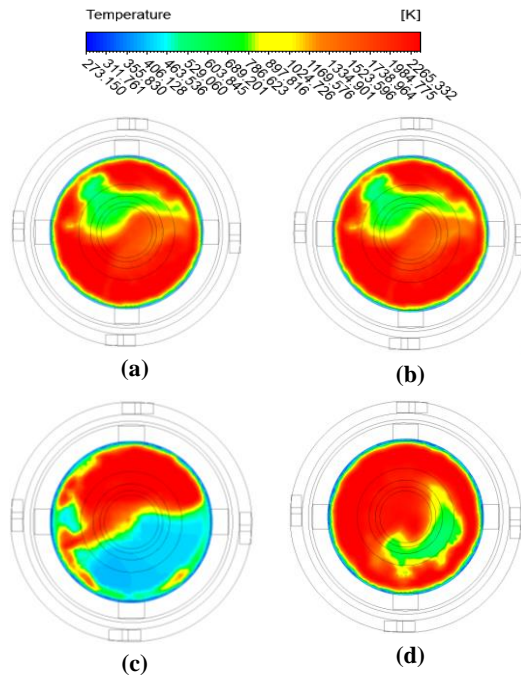
Gambar 4.16 Grafik polutan CO terhadap *swirl number* pada *equivalence ratio* 2,4

Polutan CO pada *equivalence ratio* 2,4 memiliki pola grafik dimana semakin tinggi *temperature* juga semakin rendah nilai CO seperti pada *equivalence ratio* 1,6 dan 1,9. Dengan nilai fraksi massa CO terendah pada *swirl number* 0,77 sebesar 0,0637. Sehingga pada *swirl number* 0,77 memiliki pembakaran yang sempurna dimana nilai fraksi massa CO dan polutan NO masing-masing memiliki nilai yang rendah.

Distribusi *temperature* yang direpresentasikan berupa kontur tertera pada gambar 4.17 sebagai berikut,



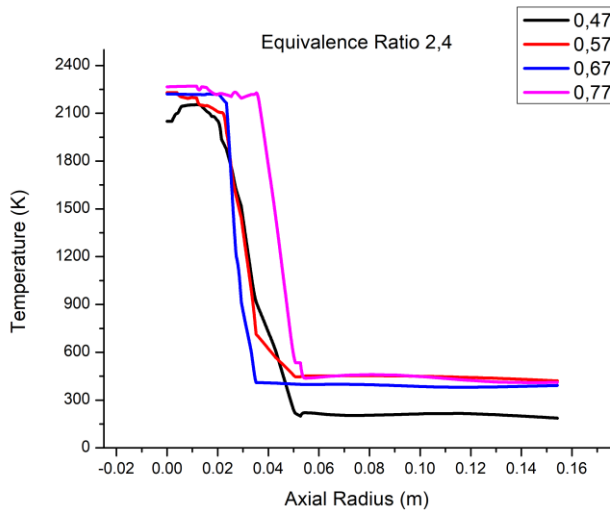
Gambar 4.17 kontur temperature pada *Equivalence Ratio* 2,4 dengan *swirl number* (a) 0,47 (b) 0,57 (c) 0,67, dan (d) 0,77



Gambar 4.18 kontur temperature penampang melintang pada *equivalence ratio* 1,6. Dengan *swirl number* (a) 0,47 (b) 0,57 (c) 0,67, dan (d) 0,77

Kontur yang didapat dari variasi *equivalence ratio* 2,4 cenderung memiliki kontur *temperature* yang variatif. Dari gambar 4.17 *swirl number* 0,77 memiliki kontur warna cenderung warna hijau dan biru pekat hal ini dikarenakan karena pada *swirl number* 0,77 merupakan *flame temperature* maksimum yaitu sebesar 2249,02 K. Disisi lain, *swirl number* 0,77 memiliki kemiripan distribusi *temperature* dengan *swirl number* 0,47 hal ini dikarenakan *temperature* yang tidak jauh berbeda hanya selisih sekitar 11,67 K dengan kontur warna biru tua masih mendominasi pada *swirl number*

0,47 dibanding dengan *swirl number* 0,77. Pada *swirl number* 0,67 memiliki *temperature* yang lebih rendah diantara *swirl number* lainnya. Pada *equivalence ratio* ini mengalami penurunan *temperature* dari *swirl number* 0,47 hingga 0,67. Pada *swirl number* 0,47 dan 0,77 memiliki kontur yang panasnya cenderung menyebar dengan dominan warna hijau dengan *temperature* di sekitar 500K. Pada penampang melintang pada bidang ZY pada variasi *equivalence ratio* 2,4 masih terdapat kontur berwarna biru yang secara representatif menandakan bahwa *temperature* masih rendah jika dibandingkan dengan dua *equivalence ratio* 1,6 dan 1,97.



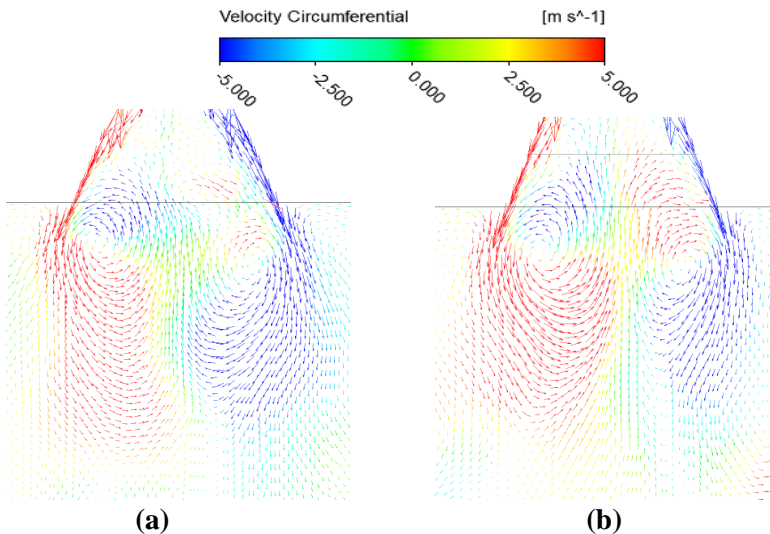
Gambar 4.19 Temperature axial radius pada *equivalence ratio* 1,97 dengan variasi empat *swirl number*.

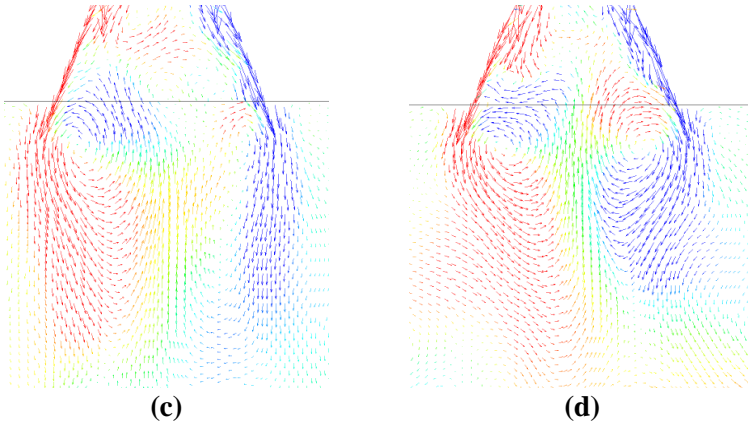
Gambar 4.19 merupakan grafik temperature terhadap jarak axial pada *burner* pada *equivalence ratio* 2,4 memiliki *flame stagnation point* yang lebih rendah

dibandingkan dengan *equivalence ratio* sebelumnya yaitu dengan nilai terjauh sebesar 0,03644 m pada *swirl number* 0,77. sedangkan nilai *flame stagnation point* terendah terdapat pada *swirl number* 0,47 sebesar 0.02018 m. Hal ini menunjukkan bahwa tingginya *temperature flame* juga akan mempengaruhi *flame stagnation point*. Sama halnya dengan *equivalence ratio* 1,6 dan 1,97 juga terjadi penurunan temperature yang signifikan.

4.2.2. Distribusi Kecepatan

Pada subbab ini akan dibahas vektor kecepatan tangensial dimana besarnya kecepatan tangensial yang dihasilkan dipengaruhi oleh besarnya *swirl number*.





Gambar 4.20 Vektor kecepatan tangensial disetiap variasi *swirl number* (a) 0,47 (b) 0,57 (c) 0,67 (d) 0,77.

Representasi vektor kecepatan tangensial ini memberikan informasi bahwa posisi kecepatan tangensial maksimum di keempat variasi *swirl number* terletak di sekitar dinding dari *quarl burner*. Kecepatan tangensial disetiap variasi memiliki perbedaan, dimana kecepatan tangensial banyak terjadi pada *equivalence ratio* sebesar 0,77. Atau dapat diurutkan dari persebaran kecepatan tangensial dari kecil ke besar yaitu *swirl number* 0,47, 0,57, 0,67, dan 0,77. Dari keempat representasi vektor kecepatan, terlihat disemua *swirl number* terdapat fenomena *reversal flow* atau bisa disebut aliran balik yang diakibatkan oleh adanya *conical quarl* dan adanya *secondary inlet*. Menurut Lefebvre, A. H., dan Ballal, D. R. (2010) fenomena *reversal flow* dapat membuat hasil dari pembakaran mengalir ke daerah *upstream* sehingga bersirkulasi kembali dengan bahan bakar dan air yang datang. Sehingga *unburnt hydrocarbon* dapat teroksidasi kembali sehingga pembakar dapat berlangsung secara sempurna.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan data yang telah didapatkan beserta analisa dan pembahasan yang telah dipaparkan pada BAB IV, maka kesimpulan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Disemua reaksi pembakaran terjadi penurunan *temperature* yang signifikan dengan rata-rata penurunan sebesar 1782,645 K. Pembakaran paling sempurna dengan rendahnya nilai CO yaitu pada *swirl number* 0,77 pada *equivalence ratio* 1,97 dan 2,4. Sedangkan, pada *equivalence ratio* 1,6 terdapat perbedaan dimana pembakaran dengan fraksi massa CO paling rendah terdapat pada *swirl number* 0,57 dan dapat dikatakan pembakaran paling sempurna pada *equivalence ratio* 1,6 yaitu *swirl number* 0,57.
2. Perbedaan nilai *swirl number* berpengaruh terhadap perubahan *temperature* tetapi pengaruh *swirl number* berfluktuasi dengan pola perubahan naik turun *temperature* yang cenderung sama. Dengan *temperature* maksimum terdapat pada *swirl number* 0,57 pada *equivalence ratio* 1,6 dan 1,97 sedangkan pada *equivalence ratio* 2,4 memiliki *temperature* maksimum pada *swirl number* 0,77. Dengan *flame stagnation point* maksimum terdapat pada *swirl number* 0,57 pada *equivalence ratio* 1,6 yaitu disekitar 0,05856 m.
3. Pengaruh polutan NO_x terhadap *swirl number* disetiap *equivalence ratio* didapat bahwa pola meningkat dan turunnya nilai polutan disetiap *swirl number* sama dengan pola naik turunnya nilai *temperature* di setiap *swirl*

number. Polutan NO_x didapat maksimum pada *equivalence ratio* 1,6 dengan *swirl number* 0,57 sebesar 85,75 ppm dan terjadi perbedaan nilai polutan yang signifikan dimana pada *equivalence ratio* 1,97 dan 2,4 memiliki nilai di setiap *swirl number*-nya jauh lebih rendah.

5.2. Saran

Saran dan rekomendasi yang diberikan adalah terus dikembangkannya penelitian ini, dengan menguji tipe *partially premixed combustion* dan model yang sama dengan bahan bakar berbeda selain CH₄.

DAFTAR PUSTAKA

- A. K. Gupta, D. G. (1984). *Swirl Flows*. New York, USA: ABACUS Press.
- Becker, L. G. (2017). Experimental investigation of flame stabilization inside the quarl of an oxyfuel swirl burner. *Fuel*, 201, 124-135.
- Bhaskarra, F. V. (n.d.). LARGE EDDY SIMULATION (LES) OF EFFECT IN SWIRL NUMBER TO THE EFFICIENCY OF GAS TURBINE COMBUSTION. *International Journal of Mechanical Engineering*, 2(2).
- Chen, L. Y. (2012). Oxy-fuel combustion of pulverized coal: characterization, fundamentals, stabilization and CFD modeling. *Progress in Energy and Combustion Science*, 38(2), 156-214.
- Di Mare, F. J. (2004). Large eddy simulation of a model gas turbine combustor. *Combustion and Flame*, 137(3), 278-294.
- Eldrainy, Y. A. (2011). Large eddy simulation and preliminary modeling of the flow downstream a variable geometry swirler for gas turbine combustors. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 38(8), 1104-1109.
- F. (2001). Modeling Partially Premixed Combustion. In *FLUENT 6.3 User's Guide* (pp. 16-1-16-8). Fluent inc. doi:<http://www.afs.enea.it/fluent/Public/Fluent-Doc/PDF/chp16.pdf>

- How Gas Turbine Power Plants Work*. (n.d.). Retrieved from U.S. Department of Energy: <https://www.energy.gov/fe/how-gas-turbine-power-plants-work>
- Irianto, S. K. (n.d.). ANALYSIS OF THE EFFECT OF CHANGES IN FUEL INJECTOR POSITION ON GAS TURBINE COMBUSTION EFFICIENCY USING LARGE EDDY SIMULATION (LES). *International Journal of Mechanical Engineering*.
- Jiang, X. &. (2016). Numerical techniques for direct and large-eddy simulations.
- Jones, W. P. (2012). LES of a turbulent premixed swirl burner using the Eulerian stochastic field method. 159(10). *Combustion and Flame*, 3079-3095.
- Kushari, P. A., & De, D. A. (2016, November). *A Short Course on Combustion: Fundamental and Applications*. Retrieved from Knowledge Incubation for TEQIP, IIT Kanpur: <https://www.iitk.ac.in/tkic/workshop/gian/2/content/GIAN-Lecture-6.pdf>
- Lefebvre, A. H. (2010). Gas turbine combustion: alternative fuels and emissions.
- Li, S. Z. (2015). Large-eddy simulation of flow and combustion dynamics in a lean partially premixed swirling combustor. *Journal of the Energy Institute*.
- Li, S. Z. (2017). A Large-Eddy Simulation–Linear-Eddy Model Study of Preferential Diffusion Processes in a Partially Premixed Swirling Combustor With Synthesis Gases.

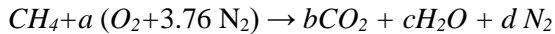
- Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 139(3), 031501.
- Liu, X. E. (2017). Effect of burner geometry on swirl stabilized methane/air flames: A joint LES/OH-PLIF/PIV study. *Fuel*, 207, 533-546.
- Metz, B. D. (2005). IPCC special report on carbon dioxide capture and storage. Intergovernmental Panel on Climate Change. *Working Group III*.
- N. M. Ken-, D. F. (1965). *Effect of Swirl on Axisymmetrical Turbulent Jets*. Kerr and Fraser Paper.
- Oberkampf, W. L. (2002). Verification and validation in computational fluid dynamics. *Progress in Aerospace Sciences*, 38(3), , 209-272.
- Ouali, S. B. (2014). Methane-air equivalence ratio effect on premixed turbulent low swirl stabilized flame.
- Tuakia, F. (2008). *Dasar-Dasar CFD Menggunakan Fluent*. Bandung: Informatika Bandung.
- Turns, S. R. (2000). *An Introduction to Combustion* (2nd ed.). McGraw Hill.
- Yilmaz, I. (2013). Effect of swirl number on combustion characteristics in a natural gas diffusion flame. *Journal of Energy Resources Technology*, 135(4), 042204.

Halaman ini sengaja dikosongkan

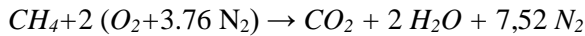
LAMPIRAN

I. Perhitungan *Equivalence Ratio* pada *premixed*

Persamaan reaksi stokiometri adalah sebagai berikut :



Setelah disetimbangkan sehingga didapat,



Dari persamaan reaksi diatas maka didapatkan hasil perbandingan massa gas dengan udara melalui perhitungan sebagai berikut :

$$\left(\frac{F}{A}\right)_{stoic} = \frac{1}{2(1 + 3.76)}$$

$$\left(\frac{F}{A}\right)_{stoic} = \frac{1}{9.52}$$

$$\left(\frac{F}{A}\right)_{stoic} = 0.105 \frac{kg CH_4}{kg udara}$$

Variasi pertama dengan $\phi = 1.6$

$$\left(\frac{F}{A}\right) = \frac{0.144}{0.856}$$

$$\left(\frac{F}{A}\right) = 0.168224 \frac{kg CH_4}{kg udara}$$

$$\phi = \frac{0.168224}{0.105}$$

$$\phi = 1.6$$

Variasi kedua dengan $\phi = 1.97$

$$\left(\frac{F}{A}\right) = \frac{0,1717}{0,8283}$$

$$\left(\frac{F}{A}\right) = 0,2073 \frac{kg \text{ CH}_4}{kg \text{ udara}}$$

$$\phi = \frac{0.168224}{0.105}$$

$$\phi = 1.97$$

Variasi ketiga dengan $\phi = 2,4$

$$\left(\frac{F}{A}\right) = \frac{0,2015}{0,7985}$$

$$\left(\frac{F}{A}\right) = 0,25235 \frac{kg \text{ CH}_4}{kg \text{ udara}}$$

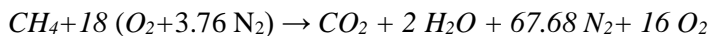
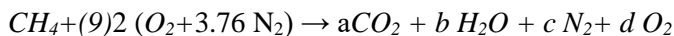
$$\phi = \frac{0.25235}{0.105}$$

$$\phi = 2.4$$

II. Perhitungan *Equivalence Ratio* pada *partially premixed*

Total Partially premixed

Variasi pertama dengan $\phi = 1,6$



$$\left(\frac{F}{A}\right)_{\text{stoic}} = \frac{1}{18(1 + 3,76)}$$

$$\left(\frac{F}{A}\right)_{stoic} = 0,011671$$

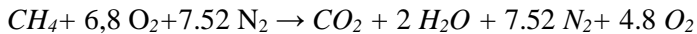
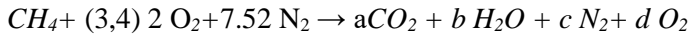
$$\left(\frac{F}{A}\right) = \frac{0,00744}{0,99256}$$

$$\left(\frac{F}{A}\right) = 0,007496 \frac{kg \text{ } CH_4}{kg \text{ udara}}$$

$$\phi = \frac{0.007496}{0.0011671}$$

$$\phi = 0.64$$

Variasi kedua dengan $\phi = 1.97$



$$\left(\frac{F}{A}\right)_{stoic} = \frac{1}{6.8 + 7.52}$$

$$\left(\frac{F}{A}\right)_{stoic} = 0,069832$$

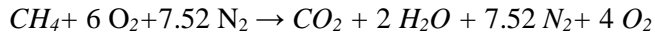
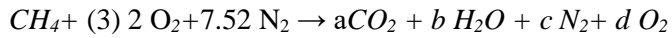
$$\left(\frac{F}{A}\right) = \frac{0,0497}{0,9503}$$

$$\left(\frac{F}{A}\right) = 0,052299 \frac{kg \text{ } CH_4}{kg \text{ udara}}$$

$$\phi = \frac{0.052299}{0.069832}$$

$$\phi = 0.75$$

Variasi kedua dengan $\phi = 2,4$



$$\left(\frac{F}{A}\right)_{stoic} = \frac{1}{6 + 7.52}$$

$$\left(\frac{F}{A}\right)_{stoic} = 0,073964$$

$$\left(\frac{F}{A}\right) = \frac{0,0631}{0,9369}$$

$$\left(\frac{F}{A}\right) = 0,06735 \frac{kg CH_4}{kg udara}$$

$$\phi = \frac{0.06735}{0.0073964}$$

$$\phi = 0.91$$

| Inlet number | Operating Point | Air | R25 | R30 | Swirl Number | Temperature (K) |
|--------------|-------------------|---------------|---------------|---------------|--------------|-----------------|
| | | Velocity(m/s) | Velocity(m/s) | Velocity(m/s) | | |
| 1 | Primary inlet | 13.31996 | 8.26199 | 8.35706 | 0.47 | 300 |
| 2 | Inclined Oxidizer | 78.56209 | 46.9281 | 47.51634 | | 650 |
| 2 | Straight Oxidizer | 19.22705 | 12.0773 | 12.1095 | | 650 |
| 3 | Oxidizer | 1.585882 | 0.95584 | 0.96581 | | 650 |

| Inlet number | Operating Point | Air | R25 | R30 | Swirl Number | Temperature (K) |
|--------------|-------------------|---------------|---------------|---------------|--------------|-----------------|
| | | Velocity(m/s) | Velocity(m/s) | Velocity(m/s) | | |
| 1 | Primary inlet | 13.31996 | 8.26199 | 8.35706 | 0.57 | 300 |
| 2 | Inclined Oxidizer | 78.56209 | 46.9281 | 47.51634 | | 650 |
| 2 | Straight Oxidizer | 18.22705 | 13.0773 | 13.1095 | | 650 |
| 3 | Oxidizer | 1.585882 | 0.95584 | 0.96581 | | 650 |

| Inlet number | Operating Point | Air | R25 | R30 | Swirl Number | Temperature (K) |
|--------------|-------------------|---------------|---------------|---------------|--------------|-----------------|
| | | Velocity(m/s) | Velocity(m/s) | Velocity(m/s) | | |
| 1 | Primary inlet | 13.31996 | 8.26199 | 8.35706 | 0.67 | 300 |
| 2 | Inclined Oxidizer | 79.56209 | 47.9281 | 48.51634 | | 650 |
| 2 | Straight Oxidizer | 18.22705 | 13.0773 | 13.1095 | | 650 |
| 3 | Oxidizer | 1.585882 | 0.95584 | 0.96581 | | 650 |

| Inlet number | Operating Point | Air | R25 | R30 | Swirl Number | Temperature (K) |
|--------------|-------------------|---------------|---------------|---------------|--------------|-----------------|
| | | Velocity(m/s) | Velocity(m/s) | Velocity(m/s) | | |
| 1 | Primary inlet | 13.31996 | 8.26199 | 8.35706 | 0.77 | 300 |
| 2 | Inclined Oxidizer | 80.56209 | 48.9281 | 49.51634 | | 650 |
| 2 | Straight Oxidizer | 17.22705 | 12.0773 | 12.1095 | | 650 |
| 3 | Oxidizer | 1.585882 | 0.95584 | 0.96581 | | 650 |

BIODATA PENULIS



Penulis lahir di Kota Malang pada 12 Mei 1996. Saat ini penulis berdomisili di Bogor, Jawa Barat. Penulis menempuh pendidikan di SDIT Raudlatul Jannah (2002 - 2008), SMP Negeri 1 Ciawi (2008 - 2011), SMA Negeri 3 Bogor (2011 - 2014), dan pendidikan S-1 di Departemen Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. Selama menjadi mahasiswa, penulis mengambil bidang minat rekayasa energi dan pengkondisian lingkungan dan menjadi koordinator asisten Laboratorium Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan di Teknik Fisika FTI ITS periode 2016-2017. Penulis juga pernah menjadi ketua *Engineering physics challenge* 2016 serta menjadi ketua divisi sosial dan teknologi Paguyuban Karya Salemba Empat untuk periode kepengurusan 2017 - 2018. Pada 1 Agustus 2017 - 31 Agustus 2017 penulis melakukan kerja praktik di PT. PJB UP Gresik. Dalam *internship* tersebut, penulis melakukan perancangan kontrol rasio antara udara dan bahan bakar untuk menghilangkan kegagalan pada saat awal pembakaran.

Penulis dapat dihubungi melalui *e - mail*
aryotyو.dr@gmail.com

Halaman ini sengaja dikosongkan